

2023



TÜBİTAK

**YEŞİL BÜYÜME TEKNOLOJİ YOL HARİTASI
KİMYASALLAR SEKTÖRÜ**

Versiyon: 12.05.2023

Görüşlerinizi ve sorularınızı politikalar@tubitak.gov.tr adresine e –postayla iletebilirsiniz.

İÇİNDEKİLER TABLOSU

Teknolojik Hedef 1	23
ENERJİ YOĞUN PROSELERDE TEMİZ ENERJİ KULLANIMI VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI, SÜRDÜRÜLEBİLİR HAMMADDE KULLANIMI	23
1.1. Kimya sanayiinde hammadde ve prosese dayalı karbon ve su ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler ve katalizörler	24
1.2. Temel petrokimyasalların ve ileri malzemelerin sürdürülebilir üretimi.....	73
Teknolojik Hedef 2:	85
BİYORAFİNERİLER	85
2.1. Biyokütle kaynaklarından (tarım, orman, evsel) ve endüstriyel organik atıklardan gazlaştırma, piroliz gibi termokimyasal ve/veya biyokimyasal yöntemlere dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi	86
2.2. Biyorafinerilerde kullanılacak biyoreaktör verimlerinin artırılması.....	133
Teknolojik Hedef 3	148
MAVİ/ YEŞİL AMONYAK ÜRETİMİ	148
3.1. Mavi Amonyak üretimine ilişkin yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi	149
3.2. Yeşil Amonyak üretimi.....	181
Teknolojik Hedef 4	203
MAVİ/YEŞİL METANOL ÜRETİMİ	203
4.1.Mavi Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	205
4.2. Yeşil Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	214
Teknolojik Hedef 5	233
YEŞİL KİMYASALLAR (ESTERLER, OLEOKİMYASALLAR, EPOKSİLER GİBİ) VE SENTETİK YAKITLAR	233
5.1. Esterleşme proseslerinin minimum enerji ile ve sürdürülebilir hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilmesi.....	234
5.2. Plastik sektörü için plastifiyan ve alev geciktirici üretimi.....	245
5.3. Yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimi	259
5.4. Biyobazlı poliol üretim süreçlerinin geliştirilmesi (poliüretan ve poliester üretimlerinde kullanılmak üzere)	268
5.5. Karbon kaynağı olarak karbondioksitin yeşil kimyasalların üretiminde kullanılması ...	273
5.6. Karbon kaynağı olarak karbondioksit ve yeşil hidrojenin kullanılması ile sentetik yakıt üretimi	284
Teknolojik Hedef 6	291
YEŞİL HİDROJEN ÜRETİM PROSELERİ	291
6.1. Elektroliz proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi	

6.2. Fotokatalitik proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi.....	319
6.3. Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi	326
Teknolojik Hedef 7.....	352
YEŞİL KİMYADA İLERİ AYIRMA TEKNOLOJİLERİ-MEMBRANLAR VE ADSORBANLAR	352
7.1. Membran üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler.....	354
7.2. Yeni adsorban/adsorbent üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler	381
Teknolojik Hedef 8.....	401
KAUÇUK SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLECEK YENİ VEYA GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ALTERNATİF MADDELER.....	401
8.1. Kauçuk sektöründe yenilikçi geridönüşüm proseslerinin geliştirilmesi.....	402
8.2. Doğal kauçuk ve karbon siyahı yerine kullanılabilir daha çevre dostu alternatif ürünlerin geliştirilmesi.....	418
Teknolojik Hedef 9.....	432
YERLİ KAYNAKLARDAN VE ATIKLARDAN KRİTİK HAMMADDELERİN ÜRETİMİ	432
9.1. Yerli Kaynaklardan ve atıklardan geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi	433
EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Kimyasallar Danışma Grubu Üyeleri	453
EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Kimyasallar Sektörel Odak Grubu Üyeleri	455
EK3: Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli TÜBİTAK Yetkilileri	457



Şekil 1. Kimyasallar Sektörünün Yeşil Dönüşümü için Teknolojik İhtiyaçlar ve Çözümler

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Kimyasallar Sektörü Özet Tablosu

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
1. Enerji yoğun proseslerde Temiz Enerji Kullanımı ve Enerji Verimliliğinin Artırılması, Sürdürülebilir Hammadde Kullanımı	1.1. Kimya sanayiinde hammadde ve prosese dayalı karbon ve su ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler ve katalizörler	1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları	Gazlaşma piroliz uygulması için THS:9 Katalitik piroliz uygulması için THS:7-9	Gazlaşma piroliz uygulması için THS:9 Katalitik piroliz uygulması için THS: 6	2026
		1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması	Ham petrolden kimyasal üretimi için THS:7	Ham petrolden kimyasal üretimi için THS : 4	2035
		1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi	5	3-4	2026-2030
		1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu	6	3	2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması	Ürünler bazında THS ilgili bölümde tablo olarak verilmiştir.	Ürünler bazında THS ilgili bölümde tablo olarak verilmiştir.	2030
		1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler	Solvent kazanımı için THS: 5-9 Diğer kimyasallar ve atıktan bileşen kazanımı için THS: 3-5	Solvent kazanımı için THS: 4-9 Diğer kimyasallar ve atıktan bileşen kazanımı için THS: 3-4	2030
	1.2. Temel petrokimyasalların sürdürülebilir üretimi	1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi	6-9	3-7	2030
		1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET monomerlerinin geri kazanılması	6-9	3-7	2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi	Piroliz ve katalitik piroliz çarısı eldesi için THS: 6-9 Piroliz ve katalitik pirolizde karbon siyahı eldesi için THS: 6-9 Çardan rafinasyon ile karbon siyahı eldesi için THS: 6-9	Piroliz ve katalitik piroliz çarısı eldesi için THS: 6-9 Piroliz ve katalitik pirolizde karbon siyahı eldesi için THS: 6-9 Çardan rafinasyon ile karbon siyahı eldesi için THS: 6-9	2030
2. Biyorafineriler	2.1. Biyokütle kaynaklarından (tarım, orman, evsel) ve endüstriyel organik atıklardan gazlaştırma, piroliz gibi termokimyasal ve/veya biyokimyasal yöntemlere dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi	2.1.a Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi • (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri ile biyoyakıt ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısı değerini artıracak	Biyokütle ve organik atıklar Gazlaştırma ve Piroliz için THS: 6-9 Sentez gazından yakıt ve değerli kimyasal üretimi için THS: 4-9 (Hidrotermal) Karbonizasyon için THS: 4-6	Biyokütle ve organik atıklar Gazlaştırma ve Piroliz: THS: 6-9 Sentez gazından yakıt ve değerli kimyasal üretimi için THS: 4-7 (Hidrotermal) Karbonizasyon için THS: 2-3	2026-2030-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		<p>katalizörlerin geliştirilmesi</p> <ul style="list-style-type: none"> Organik atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik seçici heterojen katalizörlerin geliştirilmesi 			
		<p>2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi</p> <ul style="list-style-type: none"> Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılacak platform kimyasalların üretilmesi 	6-9	4-7	2026-2030-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		<p>2.1.c.Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi</p> <ul style="list-style-type: none"> Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi 	<p>Biyogaz ve Biyometan için THS : 6-9</p> <p>Biyoetanol için THS: 9</p> <p>Biyobütanol için THS: 3-4</p> <p>Biyohidrojen için THS: 3-5</p> <p>Biyohitan (biyometan+biyohidrojen) için THS: 6-9</p> <p>Digestattan gübre ve toprak iyileştirici vb ürünlerin eldesi için THS: 6-9</p> <p>Digestattan N-P ve diğer ürünlerin kazanımı için THS: 3-4</p>	<p>Biyogaz için THS: 6-9</p> <p>Biyometan için THS: 4-6</p> <p>Biyoetanol için THS: 9</p> <p>Biyobütanol için THS. 3-4</p> <p>Biyohidrojen için THS:3-5</p> <p>Biyohitan (biyometan+biyohidrojen) için THS:4-6</p> <p>Digestattan gübre ve toprak iyileştirici vb ürünlerin eldesi için THS: 6-9</p> <p>Digestattan N-P ve diğer ürünlerin kazanımı için THS: 3-4</p>	2026-2030
	2.2.Biyorafinerilerde kullanılacak biyoreaktör verimlerinin artırılması	2.2.a. Biyorafinerilerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli,	7-9	7-9	2026

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi			
		2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi	7-9	THS:2-4 (Asetik asit ve Laktik asit hariç) Asetik asit ve Laktik asit için THS: 7-9	2026-2030
3. Mavi/ Yeşil Amonyak Üretimi	3.1. Mavi Amonyak üretimine ilişkin yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi	3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar	7-9	7-9	2026-2030-2035
		3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları	6-9	2-4	2026-2030-2035
		3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi	7-9	1-4	2026

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması	7-9	3-4	2026-2030
	3.2. Yeşil Amonyak üretimi	3.2.a. Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi	7-9	3-4	2030
		3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi	5-8	4-7	2030
		3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi	3-4	1-3	2030-2035
4. Mavi/Yeşil Metanol Üretimi	4.1. Mavi Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	4.1.a. Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız	8-9	4-5	2026-2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi			
	4.2. Yeşil Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi	4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi	8-9	4-5	2026-2030
		4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi	3-5	1-3	2026-2030-2035
5. Yeşil Kimyasallar (Esterler, Oleokimyasallar, Epoksiler gibi) ve Sentetik Yakıtlar	5.1. Esterleşme proseslerinin minimum enerji ile ve sürdürülebilir hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilmesi	5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi	5-9	2-4	2030
		5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar	7-9	4-7	2030
		5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi	6-9	2-4	2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
	5.2. Plastik sektörü için plastifiyan ve alev geciktirici üretimi	5.2.a Doğa dostu olmayan plastifiyanlara) alternatif olarak çoklu alkollerin katı yağ asitleri ve/veya biyoteknolojik yöntemle elde edilen çoklu asitler ile oluşturdukları esterlerin ve ayrıca halojenli alev geciktiricilere alternatif olarak bazı esterlerin üretimi	5-9	1-4	2030
	5.3. Yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimi	5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri	5-9	3-5	2030
	5.4. Biyobazlı polioliol üretim süreçlerinin geliştirilmesi (poliüretan ve poliester üretimlerinde kullanılmak üzere)	5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması	7- 9	2-4	Biyobazlı polioliol üretimi, 2026 Petrokimya bazlı hammaddeler e alternatif diol ve diasit üretimi; 2030-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
	5.5. Karbon kaynağı olarak karbondioksitin yeşil kimyasalların üretiminde kullanılması	5.5.a. Poliüretan/poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılacak yeşil kimyasalların (örn halkasal karbonat (cyclic carbonate) üretimi	5-9	2-4	2030-2035
		5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı	4-9	1-3	2030-2035
	5.6. Karbon kaynağı olarak karbondioksit ve yeşil hidrojenin kullanılması ile sentetik yakıt üretimi	5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi	4-6	3-4	2030
6. Yeşil Hidrojen Üretim Prosesleri	6.1. Elektroliz proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi	6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi	6-9	3-6	2026-2030
		6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf	4-8	3-5	2026-2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi			
		6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi (Alkalın, PEM vb.)	6-9	3-5	2026-2030
	6.2. Fotokatalitik proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi	6.2.a Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi	3-6	2-5	2026-2030
	6.3. Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi	6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi	4-8	2-4	2026-2030
		6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi	4-8	2-5	2026-2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kraking sistemlerinin geliştirilmesi	4-8	2-4	2026-2030
7. Yeşil Kimyada İleri Ayırma Teknolojileri- Membranlar ve Adsorbanlar	7.1. Membran üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler	7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması	Yeni nesil alternatif maddelerle membran üretimi için THS: 7-9 Daha önce denenmemiş hammddeler ile ilgili proses geliştirme ve sürdürülebilirlik çalışmaları için THS: 3-5	3-5	2026-2030
		7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi	Desalinasyon membranların geliştirilmesi için THS: 7-9 Proses geliştirilmesinde alternatif enerji kaynaklarının ve atık ısının değerlendirilmesi için THS: 5-7 Yeniden kullanılabilir/geri dönüştürülebilir özellikler ve daha önceden çalışılmamış alternatif yeşil malzemelerin kullanımı için THS: 2-4	3-5	2026-2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi	Yeşil kimyasalların ve sentez yöntemlerinin membran üretimde kullanımı için THS: 7-9 Yeşil sentez ve yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisinin üretimde uygulanması için THS: 4-6	3-4	2026-2030
		7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi	Verimi yüksek, enerji ihtiyacı düşük, sıvı atığı az membranlar üretimi için THS: 5-6	2-3	2026-2030-2035
		7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi	7-9	Tek kanallı ve çok kanallı borsal seramik membran üretimi için THS: 2-4 MF, UF, Fine UF düzeyinde ayırma yapabilen tek kanallı borsal seramik membranların üretimi için THS: 4-5	2026-2030-2035
	7.2. Yeni adsorban/adsorbent	7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak biyobazlı	Atıklardan ve güncel alternatif hammaddelerden yeni adsorbanların	Atıklardan ve güncel alternatif hammaddelerden yeni	2026-2030-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
	üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler	adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi	geliştirilmesi ve adsorbana özgü adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı için THS: 2-4 Konvansiyonel adsorpsiyon prosesleri için THS: 7-9 MOF gibi nispeten yeni adsorbanların üretimleri ve denemeleri için THS: 6-7	adsorbanların geliştirilmesi ve adsorbana özgü adsorpsiyon sistemlerinin tasarımı için THS: 2-4 Konvansiyonel adsorpsiyon prosesleri için THS: 7-9 MOF gibi nispeten yeni adsorbanların üretimleri ve denemeleri için THS: 4-5	
		7.2.b. Suların ileri arıtılmasında kullanılacak biyobazlı karbon adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi	Yeni Adsorban Geliştirme Çevre dostu seçici adsorban uygulamaları için THS: 2-5 Reçine tabanlı büyük ölçekli uygulamalar için THS: 6-9 Kullanılmış Adsorbanların Yönetimi için THS: 3-6 Adsorpsiyon Proses Geliştirme için THS: 4-7	Yeni Adsorban Geliştirme Çevre dostu seçici adsorban uygulamaları için THS: 2-5 Reçine tabanlı büyük ölçekli uygulamalar için THS: 6-9 Kullanılmış Adsorbanların Yönetimi için THS: 2-4 Adsorpsiyon Proses Geliştirme için THS: 3-5	2026-2030-2035

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik biyobazlı karbon adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi	Endüstriyel ölçekte yanma sonrası gaz adsorpsiyonunda THS:7-9 TSA ile atık gaz arıtımında THS: 4-9	Endüstriyel ölçekte yanma sonrası gaz adsorpsiyonunda THS:1-4 TSA ile atık gaz arıtımında THS: 1-4.	2026-2030-2035
8. Kauçuk Sektöründe kullanılacak yeni veya geri dönüştürülmüş alternatif maddeler	8.1. Kauçuk sektöründe yenilikçi geridönüşüm proseslerinin geliştirilmesi	8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı	7-9	3-4	2026
		8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması	6-9	3-4	2026
	8.2. Doğal kauçuk ve karbon siyahı yerine kullanılacak daha	8.2.a. Taraxacum kok-saghyz (TKS) kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi	2-4	Faaliyette bulunulmamaktadır.	2026

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
	çevre dostu alternatif ürünlerin geliştirilmesi	8.2.b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar	7-9	3-4	2030-2035
9. Yerli Kaynaklardan ve Atıklardan Kritik Hammaddelerin Üretimi	9.1. Yerli Kaynaklardan ve atıklardan geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi	9.1.a. Güneş pillerinde ve yarın iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.	1-4	1-4	2026-2030

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
		9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.	6-9	3-4	2026-2030
		9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan killerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması	6-9	4-7	1. Sıvı atıklardan lityum geri kazanımı proses iyileştirme Ar-Ge süresi: 2026 2. Katı atıklardan lityum geri kazanımı proses geliştirme Ar-Ge süresi: 2030 3. Lityum karbonattan lityum hidroksit

TÜBİTAK Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası – Kimyasallar Sektörü, 2023

Hedef	Kritik Ürün/Teknoloji	Araştırma, Teknoloji Geliştirme ve Yenilik Konusu	Dünyadaki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyesi	Zaman Tahminleri Kısa Vade: 2026'a kadar Orta Vade: 2030'a kadar Uzun Vade: 2035'e kadar
					üretimi Ar-Ge süresi: 2026
		9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri	3-5	1-3	2030

Teknolojik Hedef 1:

**ENERJİ YOĞUN PROSESLERDE TEMİZ ENERJİ KULLANIMI VE
ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASI, SÜRDÜRÜLEBİLİR
HAMMADDE KULLANIMI**

*Kimya sanayinde kullanılan enerji yoğun proseslerde **karbon ayak izini azaltacak ve enerji verimliliğini artıracak**, yenilikçi **teknolojiler ve katalizörlerin geliştirilmesi**, üretime entegre edilmesi ve **sürdürülebilir hammadde kaynak kullanımının artırılması***

Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.

1.1. Kimya sanayiinde hammadde ve prosese dayalı karbon ve su ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler ve katalizörler

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları**
- 1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması**
- 1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi**
- 1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu**
- 1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması**
- 1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler**

Kritik Ürün/Teknoloji 1.1.

1.1. Kimya sanayiinde hammadde ve prosese dayalı karbon ve su ayak izinin azaltılmasına yönelik yenilikçi çözümler ve katalizörler

A.Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Fosil, nükleer ve hidroelektrik enerjiyle ilgili çevresel kaygılar alternatif kaynakların cazibesini artırmaktadır. Örneğin, fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO₂ emisyonları 2005 ve 2009 yılları arasında ~%11 oranında artmıştır. Ulaştırma ve sanayi sektörlerinde devam eden yüksek sera gazı emisyon oranları, yalnızca çevreyi değil, nihayetinde ekonomiyi de olumsuz etkilemektedir¹.

Benzen, toluen ve ksilenler ve bunların türevleri olan stiren, pazar açısından ilk 15 petrokimyasal arasında yer almakta ve çok sayıda ikincil ara ürün ve nihai ürün üretmek için yapı taşları olarak kullanılmaktadır. Bu bileşikler büyük miktarlarda ve fosil hammaddelerden üretilmektedir.

Distile petrol ürünlerinin (örneğin, nafta) veya gazın (örneğin, etan) termal dönüşümü (termal kraking), günümüzde olefin üretiminde en yaygın teknolojidir. Aromatikler de yan ürün olarak üretilmektedir. İklim değişikliği ile mücadele için konvansiyonel termal kraking uygulamalarının azaltılması önemlidir. Bu amaçla, termal prosesin ihtiyaç duyduğu enerji elektrikle karşılanmalı veya hidrojen veya amonyağa kaydırılmalı ve hammadde kaynakları biyokütle veya organik atık içerecek şekilde değiştirilmelidir (piroliz veya benzer dönüştürme teknolojileri aracılığıyla).

Temel kimyasal ara mamullerin üretimi için alternatif hammaddelere geçiş bir zorunluluktur. Anahtar alternatif karbon kaynakları, biyojenik ve doğrudan havada tutulan CO₂ (atmosferik karbon) ile sanayi kaynaklı CO₂ ve organik katı atıklardır. 2050 yılına kadar, karbon hammadde kaynaklarının ~%82'sinin alternatif kaynaklardan elde edileceği ve kimyasal üretim zincirinde yalnızca 77 Mt fosil karbon kaynaklarının kullanılacağı öngörülmektedir. Döngüsel karbon ekonomisi kapsamında diğer çabalar göz önüne alındığında (mekanik geri dönüşüm, çözünme ve depolimerizasyon dahil), geriye kalan 30-60 Mt poliolefinin (veya üretilen toplam plastik atığın ~%5-15'i) piroliz için kullanımı uygundur. Sınırlı atık plastik hammadde kaynağı, yalnızca atık plastik mekanik geri dönüşüm sektörü ile rekabetten ve sınırlı sayıda atık yönetimi altyapısından değil, aynı zamanda piroliz teknolojisinin gerektirdiği atık kalitesinin neden

¹ Zhang, L., Bao, Z., Xia, S., Lu, Q., & Walters, K. B. (2018). Catalytic pyrolysis of biomass and polymer wastes. *Catalysts*, 8(12), 659

olduğu doğal sınırlamalardan da kaynaklanmaktadır. Yalnızca temiz PE, PP ve polistiren karışımları piroliz prosesinde kullanılabilir ve bu gereklilik atık plastik tasnifinde kayıplara yol açmaktadır. Düşük karbon emisyonlu teknoloji yatırımları, mevcut buhar kraking varlıklarından yararlandığı için pirolize yöneliktir. Karbon kaynaklarının (biyokütle, atık, CO₂) yoğunlaştırılmış bir biçimde (örneğin, metanole veya piroliz yağına dönüştürülerek) taşınması, özellikle kırsal ve uzak bölgelerdeki merkezi endüstri kümelenmelerine ulaşmak için gereklidir. Atığın pirolizi, piroliz yağının buhar kraking ünitelerine taşınmasıyla büyük bir gelişim potansiyeli sunmaktadır. Piroliz proseslerinin küçük ölçekli operasyonlara düşük maliyetle izin verecek şekilde iyileştirilmesi, dağıtılmış operasyonları mümkün kılmamanın anahtarlarından biri olarak görülmektedir. Düşük plastik kaçakları, yüksek geri dönüşüm oranları ve yüksek atık hammadde kullanımı sağlamak için atık yönetimi altyapısı geliştirmek de önem arz etmektedir.

Ayrıca, kimyasal üretim için alternatif karbon hammaddelerinin kullanılmasını sağlamak üzere ağırlıklı olarak (%99) amonyak ve metanol üretimi için hammadde olarak yılda 234 Mt yeşil hidrojene ihtiyaç duyulacağı da değerlendirilmektedir.

Olefinler için iyileştirilmiş buhar kraking yoluyla üretim maliyeti, metanolden ksilen (MTX) üretimine göre kimyasal çıktılar temelinde ortalama ~100\$/ton daha ucuzdur. Kraking, net sifıra ulaşmak için maliyetli iyileştirmelere (örneğin hidrojen/amonyak ile ısıtma veya elektrifikasyon) veya maliyeti ortalama ~%60 oranında artıracak daha pahalı hammaddelere (ör. biyo-yağlar, piroliz yağı) ihtiyaç duymaktadır. Konvansiyonel kraking proseslerinden MTX ekonomisine geçiş pahalı yeni tesisler gerektirmekte olup, genellikle daha düşük ölçekli ve dolayısıyla daha az ekonomiktir. Konvnsiyonel kraking prosesi kısmen piroliz yağı ve biyo-yağlarla beslenebileceğinden, ancak fosil hammaddelerin kullanımından tamamen vazgeçilmesi halinde MTX'e geçişin küresel ölçekte gerçekleşmesi öngörülmektedir.

Anahtar teknolojiler (örneğin karbon yakalama ve depolama, elektrifikasyon ve kömür bazlı olmayan metanolden olefin ve metanolden aromatikler) ve dögüsel karbon ekonomisi (örneğin karbon tutma ve kullanma, gazlaştırma ve piroliz) için halen büyük ölçekli kavram & teknoloji konsept doğrulama gerekmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.1.a.Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Evsel ve endüstriyel organik katı atıkların yönetimi, modern toplumlarda en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. Avrupa Komisyonu Direktifi 2008/98/EC'ye göre, atık

önleme ve yönetim mevzuatı ve politikasında aşağıdaki atık hiyerarşisi bir öncelik sırası olarak uygulanacaktır: önleme, yeniden kullanıma hazırlama, geri dönüşüm, diğer geri kazanım, (örneğin enerji geri kazanımı) ve son olarak bertaraf. Bu nedenle, atık malzemelerin yeniden kullanımının mümkün olmadığı durumlarda, organik atıkların birincil yapı taşlarına dönüştürülerek veya katma değeri yüksek kimyasal ve yakıt türevlerine dönüştürülerek geri dönüşümü uygulanmalıdır.

Bu amaçla, petrokimya endüstrisindeki en önemli termokimyasal süreçlerden biri olan piroliz, tehlikeli organik katı atıkların sürdürülebilir yönetimine bir çözüm sunmaktadır. Biyokütle gibi organik hammaddelerin/atıkların hızlı pirolizi ile ağırlıkça %70-80 oranında sıvı ürün (piroliz yağı), kömür (çar) ve gazlar (CO, CO₂ ve metan) üretilmektedir. Piroliz yağı, çeşitli katma değerli kimyasalların (örneğin fenolikler) bir havuzudur veya hidrojen ile işleme prosesleri yoluyla geleneksel rafinerilerde petrol fraksiyonları ile birlikte işlenmek üzere biyoyakıtlara veya biyo-ham petrole doğru aşağı akış yönünde (downstream) iyileştirilebilir (upgrading).

Hızlı pirolizde, katı atıklar inert atmosfer altında yüksek ısıtma hızlarında orta/yüksek sıcaklıklara (400-700°C) ısıtılmaktadır. Oluşan yoğunlaşabilir piroliz buharları hızlı bir şekilde yoğunlaştırılarak yüksek bir verimle piroliz yağı elde edilmektedir. Lignoselülozik biyokütleden (odun veya tarımsal atık) elde edilen piroliz yağı fenolikler açısından zengindir ve ayrıca asetik asit, ketonlar, aldehitler, eterler, esterler, furanlar, alifatikler ve aromatikler içermektedir. Piroliz prosesi ile ayrıca gaz ürünler de (ağ. %10–20; CH₄, CO₂, CO) ve çar (%10–25 wt.) elde edilmektedir.

Odun türevi piroliz yağının (biyo-yağ) özellikleri, katalitik hızlı piroliz (CFP) ile yerinde temel işlemler uygulanarak (distilasyon vb.) iyileştirilebilmektedir. CFP'de, başlangıçta oluşan termal piroliz buharları deoksijenasyon reaksiyonlarına sokularak daha az oksijenli biyo-yağ elde edilmektedir. Katalitik piroliz ile biyo-yağ üretiminde genellikle asidik zeolitler (ZSM-5) kullanılmaktadır ve ara piroliz buharlarının kreaking, de-alkoksilasyon, (de)alkilasyon, aromatisasyon, yoğunlaştırma ve oligomerizasyon reaksiyonlarını indükleyerek, yüksek aromatik bir ürünün üretimine yol açmaktadır. Bu ürün mono-aromatik hidrokarbonlar (BTX) ve naftalenlerden oluşan biyo-yağdır².

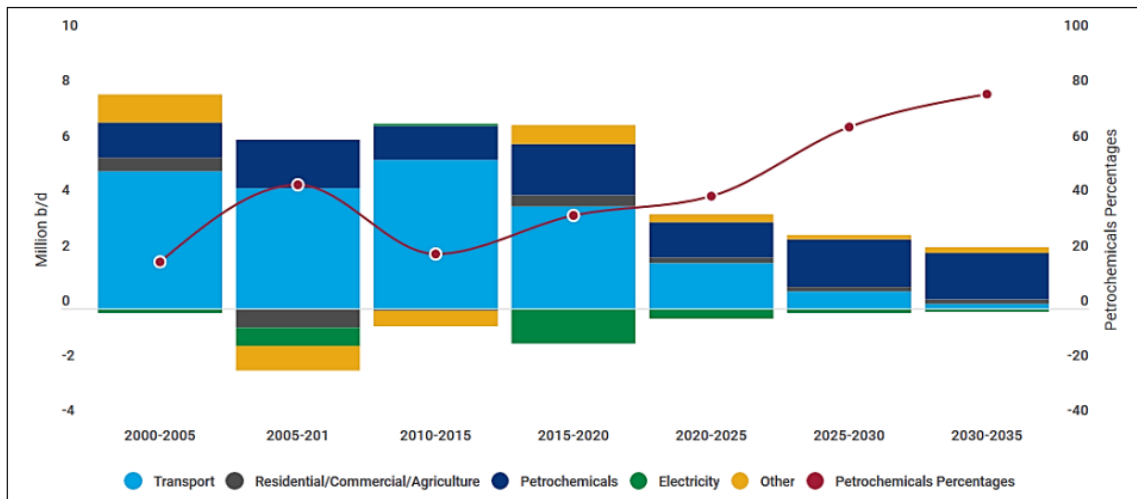
² Rekos, K. C., Charisteidis, I. D., Tzamos, E., Palantzas, G., Zouboulis, A. I., & Triantafyllidis, K. S. (2022). Valorization of Hazardous Organic Solid Wastes towards Fuels and Chemicals via Fast (Catalytic) Pyrolysis. *Sustainable Chemistry*, 3(1), 91-111.)

Zhang, L., Bao, Z., Xia, S., Lu, Q., & Walters, K. B. (2018). Catalytic pyrolysis of biomass and polymer wastes. *Catalysts*, 8(12), 659.

1.1.b.Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

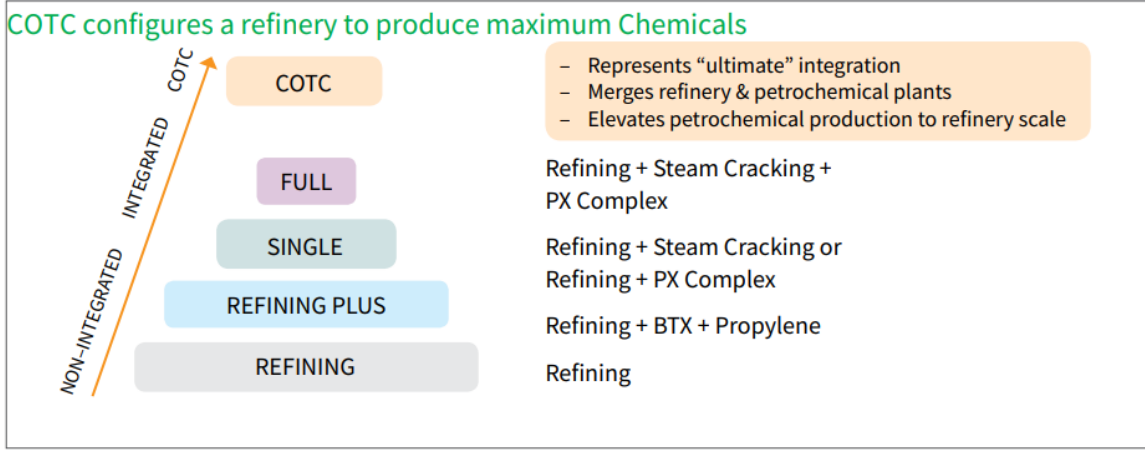
Ham petrol geçen yüzyıldan itibaren birincil enerji kaynağı olmaya devam etmekte ve petrol rafinerileri dünya çapındaki enerji sisteminde önemli bir rol oynamaktadır. Benzin, dizel ve akaryakıt gibi petrol türevi olarak ulaşımda kullanılan yakıtlar şu anda rafinerilerde üretilen ürünlerin yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (World Oil Outlook 2040, 2019). Günümüzde küresel petrol tüketimi günlük yaklaşık 100 milyon varildir ve önümüzdeki 10 yıl içinde her yıl günlük yaklaşık 1 milyon varil ek bir talep artışının olacağı tahmin edilmektedir (Alabdullah ve ark., 2020). Ulaşım filosunun yavaş ama istikrarlı bir şekilde genişlemesine paralel elektrifikasyonunun yakın gelecekte ham petrole dayalı yakıt talebini azaltacağı ve bu durumun petrol endüstrisini yeni bir yöne çekeceği beklenmektedir (TCGR-CAP raporu, 2020).

ABD'de uygulanan Kurumsal Ortalama Yakıt Ekonomisi (CAFE) standartları gibi verimlilik standartları, Şekil 1'de gösterildiği üzere mevcut on yılın ikinci yarısında petrol türevi yakıtların kullanımında beklenen daha yavaş büyümeyi ve 2030'dan sonra talepteki olası düşüşü kısmen açıklamaktadır (World Oil Outlook 2040, 2019).



Şekil 1.1. Ham petrole olan talebin büyüme kaynakları (Wood Mackenzie editorial, 2019)

Geleneksel rafinerilerle karşılaştırıldığında ham petrolden kimyasallara (COTC) projelerinin amacı, bir varil ham petrolden elde edilen kârlılığın iki katından fazlaya çıkarılmasıdır. Bunun için Şekil 1.2'de gösterildiği gibi rafineri ve petrokimya entegrasyonu kapsamında, bir varil petrolün %70'nin kimyasallara dönüştürülmesi hedeflenmektedir.



Şekil 1. 2. Rafineri ve petrokimya entegrasyonu (IHS Markit-COTC raporu, 2019)

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Çalışma proseslerinin sürekli yada kesikli olması prosese geri döndürülebilecek olan katalizörlerin geri döndürülmesi konusunda fikir vermektedir. Kesikli proseslerde geri dönüş çok mümkün olamamaktadır. Miktarı az olan katalizörlerin geri dönüş konusunda oluşturulabilecek prosesler uygulanabilir değildir, ancak sürekli proseslerde toplanabilen katalizörler miktarsal olarak tekrar kullanım için toplanıp saflaştırılabilmesi daha uygulanabilir bir prosestir.

Kimyasal üretiminde, geleneksel ve çevresel olarak artık kabul görmeyen proseslerin yerini büyük ölçüde daha çevreci katalitik alternatifleri almaktadır. Kimya endüstrisi, ağırlıklı olarak organik kimyasal üretimi üzerinedir. Kimya sektöründe talep edilen katalizörlerin üretimi ise daha çok inorganik kimya alanına girmektedir.

Kimyasalların katalitik olarak üretiminde büyük miktarlarda inorganik atık oluşmaktadır. İnorganik atık oluşumuna yolaçan başlıca katalitik kimyasal reaksiyonlar arasında çözünen metaller ve metal hidritlerle stokiometrik indirgemeler, permanganat ve altı değerlikli krom bileşikleriyle stokiometrik oksidasyonlar, halojenasyonlar, Grignard reaksiyonları ve mineral veya Lewis asitlerinin kullanımını içeren çok çeşitli reaksiyonlar sayılabilir.

Büyük ölçekli üretimi yapılan kimyasalların modern üretim prosesleri hem enerji kullanımı hem de hammadde tüketimi açısından verimli olmalı ve minimum atık üretmelidir. Bu da ancak yeni nesil verimli katalitik teknolojilerle mümkündür.

Tehlikeli ve zehirli kimyasalın taşınmasına, depolanmasına ve kullanımına getirilen yeni düzenlemeler ve kısıtlamalar da kimyasal üretiminde atık oluşumunun azaltılmasını gerekli

kılan bir diğer faktördür. Kullanımına kısıtlama getirilen kimyasalların listesi her yıl artmaktadır ve bu liste fosgen, dimetil sülfat, çeşitli organik çözücüler ve klorlu hidrokarbonları içermektedir. Alternatif katalitik proseslere geçiş ile daha çevreci çözücülerin kullanımı mümkün olabilir.

Kimyasal üretim prosesi, temelde reaktör(ler) ve ayırma-arıtma bölümlerinden oluşmaktadır. Bu bölümlerde gerçekleşen reaksiyonlarda ve/veya ayırma ve saflaştırma işlemlerinde ana reaktanlara ek olarak çözücüler ve katalizörler kullanılmaktadır. Bir prosese beslenen veya proste üretilen herhangi bir kimyasal üretim sonunda ana üründen ayrılarak uzaklaştırılmakta ya da değerlendirilmek üzere proses geri beslenmektedir. Prosese geri beslenemeyen ve ana üründen uzaklaştırılması talep edilen kimyasallar atık olarak tanımlanmaktadır. Atık kimyasallar, kontrol altına alınmadığı takdirde, havaya, suya veya toprağa karışarak çevreyi kirletmektedir.

Atık Minimizasyonu

Atık minimizasyonu, birim ana ürün başına atık miktarının azaltılmasıdır. Atık kontrol hiyerarşisindeki her bir kademenin tanımı aşağıda verilmektedir:

- Yan ürün oluşumunun azaltılması: Kimyasal reaksiyon adımlarında ticari değeri olmayan katran, ince toz vb. yan ürün niteliğinde atık bileşenlerin oluşumunun azaltılması.
- Atık oluşumuna yol açan reaksiyon envanterinin azaltılması: Reaksiyona girmeden reaktörü terkeden ve atığa dönüşen katalizör ve çözücü gibi kimyasalların prosese ilavesinin asgari düzeyde tutulması
- Atıkların yeniden değerlendirilmesi: Farklı toksisiteye sahip atıkların aynı yerde toplanmasından kaçınılması. Her atığın ayrı olarak değerlendirilmesi ve proste yeniden kullanım ve/veya yan ürüne dönüştürülmesi gibi imkanların araştırılması
- Atıktan Enerji Geri Kazanımı: Kimyasal üretimi için gereken enerji, atıkların yakılmasıyla geri kazanılabilecek olan enerjiden daha fazladır ve karbon emisyonlarına yol açmaktadır. Bu nedenle atıktan enerji üretimi daha az tercih edilmektedir. Buna karşın kullanılmış organik çözücülerin yakılması, uçucu organik bileşikler içeren gaz akımlarının insineratörlerden geçirilmesi mevcut uygulamalardan bazılarıdır.

Atık minimizasyonun uygulanamadığı yerde bertaraf ve güvenli imha yapılmaktadır. Atıklar çevreye verilmeden önce toksisitesinin, küresel ısınma potansiyelinin, patojen içeriğinin vb. zararlı etkileri azaltılmalıdır. Örneğin biyolojik atık su arıtımı, karbon adsorpsiyonu, filtrasyon, kimyasal oksidasyon vb. gibi bilinen çevre teknolojileri uygulanmaktadır.

Bir proste kullanılan hammaddenin kimyasal doğası dikkate alınmalıdır. Zehirli bir hammadde kullanımı gerekiyorsa öncelikle kullanımında minimizasyona gidilmelidir. Yeşil kimya araştırmaları ile toksik hammaddelerin yerinde üretimi ya da toksik olmayan hammaddelere geçiş sağlanmalıdır.

1.1.d.Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

21. yüzyılın enerji unsurlarından biri olarak değerlendirilen hidrojen için çeşitli Ar-Ge faaliyetleri hız kazanmaktadır. Hidrojen, doğal bir yakıt kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji üretiminden faydalanılarak su, biyokütle, nükleer ve hidrokarbon gibi kaynaklardan üretilmektedir. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen depolanmakta ve elektrik ve ısı üretmek için yakıt hücreleri gibi sistemlerde kullanılmaktadır. Hidrojen ve yakıt hücreleri; ulaşım, sanayi ve konut başta olmak üzere tüm sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanım potansiyeli ile enerji üretim alanında önemli bir role sahiptir. Hidrojen ve yakıt hücrelerinin aşağıda verilen alanlarda uygulamaları mevcuttur:

- Dağınık veya birleşik ısı ve güç sistemleri;
- Yedek güç sistemleri;
- Yenilenebilir enerji depolama; ve
- Hava, kara ve deniz yolu taşıma araçları için yardımcı güç.

Hidrojen, konvansiyonel olarak metanın buhar reformasyonu ile yüksek sıcaklıkta gerçekleşen katalitik bir reaksiyon ile üretilmektedir. Bir başka yaygın hidrojen üretim yöntemi ise suyun elektrolizidir. Bakteri veya mikroalg gibi mikroorganizmaların kullanıldığı biyolojik reaksiyonlar aracılığıyla da hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, güneş ışığı kullanılarak fotobiyolojik, fotoelektrokimyasal, fotovoltaj odaklı elektroliz ve termokimyasal yöntemlerle hidrojen üretimi yapılmaktadır. Hidrojenin üretim yöntemine göre renk kodlarıyla hidrojen sınıflandırılması yapılmaktadır (Şekil 1.3). Renk kodlamasında üretim sürecinde oluşabilen sera gazı salımı dikkate alınmaktadır.



Şekil 1.3. Hidrojen Üretim Yöntemlerine Göre Hidrojen Enerjisi Renkleri (Scita R. vd., 2020)³

Fosil yakıtlardan hidrojen elde edilmesi için kullanılan teknikler arasında su buharı reformlama, kısmi oksidasyon, piroliz ve gazlaştırma gibi üretim teknolojileri öne çıkmaktadır.

Su buharı reformlama ile doğal gazdan hidrojen üretimi toplam üretimde en büyük paya sahiptir. Sentez gazı üretiminin ardından su-gaz şift reaksiyonu uygulanarak ilave hidrojen üretimi gerçekleştirilmektedir. Hidrojen üretiminin son adımında ise, karbondioksit ve diğer safsızlıklar uzaklaştırılarak hidrojen saf halde elde edilmektedir.

Kısmi oksidasyon ile kontrollü kısmi yanma gerçekleştirilerek karbonmonoksit, karbondioksit, su, hidrojen ve metandan oluşan bir sentez gazı karışımı elde edilmektedir. Kısmi oksidasyon için katalizör kullanımı gerekli değildir.

Piroliz, oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıklarda katı yakıtların ısıl bozunması ile kömür (çar), piroliz yağı ve gazın elde edildiği bir termokimyasal dönüşüm işlemidir. Piroliz genellikle düşük sıcaklıkta piroliz ve hızlı piroliz olarak iki ana sınıfta değerlendirilmektedir. Düşük sıcaklıkta piroliz karbonizasyon olarak da adlandırılmakta olup, ana ürün çardır. Hızlı piroliz prosesinde ise ana ürün piroliz yağı olup, yanı sıra çar ve gaz ürünler de elde edilmektedir. Hidrojen üretimini artırabilmek için katalitik parçalama ve su gaz şift reaksiyonunu katalizleyen katalizörlerin kullanıldığı katalitik piroliz prosesi öne çıkmaktadır.

Gazlaştırma; katı yakıtları sentez gazına dönüştürmek için yanma stokiometrisinin altında oksijen içeren atmosferde ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bir kısmi oksidasyon prosesidir. Gazlaştırma sonucunda operasyon koşullarına bağlı olarak değişen yüzdelerde metan, hidrojen, karbon monoksit ve karbon dioksit içeren sentez gazı elde edilmektedir. Kömür, biyokütle veya katı atığın bileşimine göre sentez gazı içeriğinde kirletici olarak kükürtlü, azotlu, halojenli ve alkali bileşikleri de bulunmaktadır. Karbon yakalama, depolama ve kullanımı alanında gelişen teknolojilerin gazlaştırma proseslerine entegre edilmesi çevresel etkilerin asgari düzeye indirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Yenilenebilir enerji ile sıfır emisyonlu olarak hidrojen üretiminde başlıca teknoloji suyun elektrolizidir. Örneğin rüzgâr enerjisi kullanılarak elektroliz yöntemi ile yeşil hidrojen üretilebilmektedir. Yenilenebilir elektrik üretiminde talebe göre arz fazlası olduğunda bu enerjii hidrojen formunda depolamak ve enerji talebi olduğunda kullanmak önemli bir enerji depolama

³ Scita, R., Raimondi, P., Noussan, M. (2020). "Green Hydrogen: the Holy Grail of Decarbonisation: An analysis of the technical and geopolitical implications of the future hydrogen economy", Çalışma Belgesi, 013.2020, FEEM, İtalya.

uygulamasıdır. Benzer uygulamalar güneş enerjisi ile fotovoltaik paneller üzerinden üretim yapan güneş santralleri için de geçerlidir. Konsantre güneş kolektörleri ile termokimyasal olarak suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılması da bir diğer ümit vaat eden teknolojidir.

Nükleer santraller de açığa çıkan fazla ısıdan yararlanarak farklı kimyasal çevrimler yada ısı parçalama yoluyla hidrojen üretimi yapılabilmektedir. 1.000 MW'lık bir nükleer reaktörden yılda 200.000 ton hidrojen üretimi mümkündür. Nükleer enerji santralleri karbon emisyonu salımına neden olmadıkları için yeşil enerji kaynağı olarak görülmekte, bu reaktörler aracılığıyla üretilen hidrojen de yeşil hidrojen olarak kabul edilmektedir.

Hidrojen, enerji sektörünün geleceğinde rol oynaması muhtemel önemli bir kaynak olarak görülmektedir. Hidrojen; ulaşım, petro-kimya ve demir-çelik gibi emisyon yoğun sektörler için karbon azaltımını sağlayabilecek önemli avantajlar sunmaktadır. 2018 yılında toplam saf hidrojen talebinin %51,7'si petrol rafinerisi ve %42,6'sı amonyak üretimi içindir. Petrol rafinasyonu hidrojen talebi, rafineri ürünlerinin iyileştirilmesi için hidro-arıtma ve hidro-kırma kullanımındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. Rafineri sektöründe hidrojen talebi, daha kapsamlı dekarbonizasyon politikalarına ve petrol talebine bağlı olarak değişim göstermektedir.

Hidrojenin karbondan arındırılmış bir enerji sisteminin temel ve vazgeçilmez bir unsuru olduğu genel kabul görmektedir. 2021 Şubat ayı itibarıyla dünya genelinde 30 ülkede hidrojen yol haritası ve açıklanan büyük ölçekli toplam 228 hidrojen projesi bulunmaktadır. Bu projelerin %85'i Avrupa, Asya ve Avustralya kıtalarında gerçekleştirilmektedir. Gelişmiş ülkelerin hidrojen stratejileri, dinamik olarak büyüyen bir hidrojen pazarını işaret etmektedir. Ulusal stratejiler, 2050 için beklenen hidrojen talebinin küresel düzeyde toplamı 9.000 TWh'ye varan bir potansiyeli veya yılda yaklaşık 270 milyon ton hidrojeni işaret etmektedir. Almanya, hidrojenin gelecekteki enerji sisteminin önemli bir unsuru olduğu karbon nötr hedefini benimsemektedir. Japonya ve Güney Kore gibi bazı Asya ülkeleri, hidrojen ekonomisi ile ilgili hedeflere odaklanmakta ve uzun vadeli hedeflerini bir hidrojen ekonomisi üzerine inşa etmektedir. Avustralya, 2050 yılına kadar küresel bir hidrojen ihracatçısı olmayı hedeflemektedir.

Son yıllarda, rafineri sektöründe hidrojen talebi, artan rafinaj aktivitesi ve hidro-arıtma ve hidro-kırma için artan gereksinimlerin bir sonucu olarak önemli ölçüde artmıştır. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), deniz yakıtlarının sülfür içeriğini 2020'den itibaren %0,5'ten fazla olmayacak şekilde sınırlayan yeni yakıt yönetmeliğini getirmiştir. Bu yönetmelikle deniz ulaşımında yakıt olarak hidrojen gereksinimlerinde önemli bir artış olması beklenmektedir. Yeşil hidrojenden üretilen amonyak da alternatif bir yakıt olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır. Hidrojen Konseyi, hidrojene önümüzdeki yıllarda kamu ve özel sektör tarafından küresel olarak en az 300 milyar dolar yatırım yapılmasının beklendiğini ve hidrojenin küresel enerji talebinin neredeyse beşte birini karşılayabileceğini belirtmektedir.

Hidrojenin yaygınlaşmasını sağlayacak unsurlar arasında enerji sektöründe daha verimli ve düşük maliyetli enerji sağlanması ve çevreyi kirletmeyen temiz kaynak arayışları bulunmaktadır. Petrolün bugünkü ve gelecekte öngörülen durumu, ithalat bağımlılığı, fosil yakıtların yarattığı karbondioksit emisyonları ve Kyoto Protokolü'nün emisyonlara getirdiği sınırlamalar doğrultusunda, hidrojen çok önemli bir kaynak olarak nitelendirilmektedir. Bununla birlikte hidrojenin geleceği; altyapı ve üretim maliyetleri, hükümetlerin destekleyici politikaları ve teşvikler, yeni teknolojilerin toplum ve tüketiciler tarafından kabul görmesi gibi birçok parametreye bağlıdır.

Kimya şirketleri, ortaya çıkan hidrojen ekonomisinin fırsatlarından yararlanmak için benzersiz bir konuma sahiptir ve bunu yaparak rekabet avantajı yaratabilir. Düşük CO₂ emisyonlu hidrojen üretiminin, kimya endüstrisinde sürdürülebilir hammadde olarak önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Özetle; Kimya endüstrisinde, hidrojen çoğunlukla amonyak üretmek için hammadde olarak kullanılmaktadır. Amonyakın gübre üretiminde kullanımının yanı sıra, aynı zamanda çeşitli ev temizlik ürünlerinde amonyum hidroksit formunda kullanımı da bulunmaktadır. Endüstriyel proseslerde amonyak, soğutma ajanı, saflaştırma ajanı ve kimyasal stabilizatör görevi görmektedir. Amonyaka ek olarak, diğer kimyasal bileşikler, yakıtları ve katkı maddelerini üretmek için kimyasal bir ara girdi olarak metanol üretiminde de önemli miktarda hidrojen kullanılmaktadır. Rafinerilerde de hidrojenin önemli bir kullanımı bulunmaktadır. Ham petrolün katma değerli ürünlere parçalanması (hidrokraking), ham petrol fraksiyonlarından kükürt, azot ve metaller gibi kirleticilerin uzaklaştırılması (hidro-işlem) ve kimyasal ürünlerin stabilizasyonunda (hidrojenasyon) hidrojen kullanılmaktadır. Alternatif olarak yakın gelecekte elektrikli buhar parçalayıcıların ve elektrikli kazanların güçten ısıtmaya yönelik uygulamalarında hidrojen kullanımı öngörülmektedir. Ayrıca elektrokimyasal reaktörler yoluyla güçten kimyasal üretim proseslerinde de hidrojen kullanımı gerekmektedir.

Sonuç olarak kimya endüstrisinde üretimde hidrojen kullanımı gri hidrojene dayalı olup, CO₂ emisyonu düşük mavi hidrojene geçiş sağlanmalıdır. Mavi hidrojenin yenilikçi kimyasal proseslerde de kullanımı öngörülmekte olup, güçten ısı üretimi ve güçten kimyasal üretimi gibi uygulamalarda mavi hidrojen kullanımının uygulamalarının artırılmasına yönelik Ar&Ge ve Ür&Ge çalışmalarına da ihtiyaç duyulmaktadır.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

Paris Anlaşması'nın onaylanmasının ardından, dünya çapında "CO₂ Tutma, Dönüştürme/Tekrar Kullanma ve Depolama (CCUS)" teknolojilerine olan ilgi artmış olup, bu konuda ulusal ve uluslararası yol haritaları ve eylem planları oluşturulmaktadır. CO₂'nin

ekonomik olarak faydalı bir şekilde tekrar kullanılması uygulaması “EOR (enhanced oil recovery)-gelişmiş petrol geri kazanımı” ile başlamıştır. Bu uygulama büyük miktarlarda CO₂ kullanımına ihtiyaç duymaktadır ve sonuç olarak CO₂ jeolojik olarak depolanmaktadır. Bununla birlikte, CCUS’a olan ilgi CO₂’nin çimento, sentetik yakıtlar ve plastikler gibi diğer ürünlere dönüştürülmesine de odaklanmaktadır. Birçok yenilenebilir kaynak (özellikle güneş ve rüzgar) için maliyetlerin son zamanlarda hızla düşmesi bu alanda önemli avantajlar sunmaktadır. Yenilenebilir elektrik giderek daha ucuz hale geldiğinden, ekonomik ve çevresel olarak yararlı bir şekilde bundan yararlanabilecek CCUS potansiyel uygulamalarına ilgi önemli ölçüde artmaktadır.

CCUS, enerji ve buhar üretiminde fosil yakıt veya biyokütle kullanan santral ve endüstriyel tesislerde CO₂’nin yakalanmasını içermektedir. CO₂ ayrıca doğrudan atmosferden de yakalanmaktadır. Yerinde kullanılmazsa, yakalanan CO₂ sıkıştırılmakta ve çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere boru hattı, gemi, demiryolu veya kamyonla taşınmakta veya derin jeolojik oluşumlara (tükenmiş petrol ve gaz rezervuarları veya tuzlu su oluşumları dahil) enjekte edilmektedir (Karbon tutma ve depolama-CCS). CO₂ dönüştürmenin amacı, CO₂’yi emisyon açısından nötr veya negatif olan nihai ürünlere dönüştürmektir. Bu şekilde ekonomik olarak değerli ürün veya hizmetler üretmek için CO₂ hammadde olarak kullanılmaktadır. Potansiyel uygulama yelpazesi çok geniştir ve seraları, organik tarımı, CO₂’nin yakıtlara veya kimyasallara dönüştürülmesini, uzun ömürlü katı maddelere (örneğin plastik, karbon fiber, grafen) ve karbonat minerallerine (beton, vb) dönüşümünü içermektedir [1, 2, 3, 4].

CO₂ dönüşüm teknolojilerinin gelişimi üç ana nedenden dolayı tercih edilmektedir:

- Tutulan ve ayrılan CO₂’nin, karbondioksit kullanan sanayi dallarına aktarılması ile girdi maliyetlerinin azaltılması.
- Fosil yakıtlara alternatif sunması
- Karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik ulusal veya küresel hedeflere ulaşılmasına katkıda bulunması

Sanayide Sera Gazı Emisyon Azaltım Kapasitelerinin Yükseltilmesi Karbon Tutma Konusunda Hedeflenmesi gereken yenilikçi özellikler ve performans (Sorun alanları ve çözüm önerileri)

Ar-Ge ve Yenilik Konusu	Teknolojik Sorun Alanı	Çözüm Önerisi
Kimya Sanayi Sektörlerinde	1. Türkiye’de mevcut durumda endüstriyel baca	1. Türkiye’nin mevcut sanayisini göz önünde bulundurularak milli

<p>Karbon Tutma (Carbon Capture) Teknolojileri</p>	<p>gazlarından karbondioksit tutulması/ayrılması yapılmamaktadır.</p> <p>2. Baca gazlarındaki CO₂'nin tutma ve ayırma maliyetleri küresel olarak yüksektir (endüstriyel kaynağa bağlı olarak 50-75 USD/ton)</p> <p>3. Türkiye'deki mevcut durumdaki "yanma sonrası" prosesleri yerine yanma-öncesi (pre-combustion), oksijenli yanmalı (oxy-combustion), kimyasal döngülü (chemical looping) sistemler için vizyon çalışmaları vb. endüstriyel dönüşüm için değerlendirme çalışmaları endüstriyel sektörlerde yavaş ilerlemektedir.</p>	<p>ve yerli CO₂ tutma teknolojilerinin geliştirilmesi gereklidir. Mevcut durumda (mevcut prosesler ağırlıklı yanma sonrası "post-combustion" CO₂ giderimine uygundur) Enerji, Çimento, Demir-Çelik sektörü ve Kimya-Petrokimya sektörlerinde CO₂ tutma/yakalama'ya yönelik teknoloji geliştirilmesi için Ar-Ge ve inovasyon çalışmaları yapılmalıdır.</p> <p>2. CO₂ kaynağına uygun proses geliştirilmelidir. Yanma sonrası (post combustion) sistemlerde baca gazındaki CO₂ derişimine göre kimyasal/fiziksel absorpsiyon sistemleri geliştirilmelidir. Baca gazının basıncına göre membranlı sistemlerin fizible olduğu durumlar için CO₂ seçici membranlar ve bunların uygulanacağı tutma/ayırma prosesleri geliştirilmelidir.</p> <p><u>Ar-Ge, inovasyon ve teknoloji geliştirme çalışma alanları/çözüm önerileri:</u></p> <p>1- Kimyasal Absorpsiyon:</p> <p>✓ Amin çözeltisinin performansını arttırmak ve ısı ihtiyacı düşürmek amacıyla "aktifleştirici (promoter)" geliştirilmesi</p>
---	--	---

		<ul style="list-style-type: none">✓ Çözelti performansını arttırmak ve ısı ihtiyacı düşürmek amacıyla “Yeni Çözelti/Çözücü ” geliştirilmesi✓ Termal rejenerasyon işlemi yerine elektrokimyasal rejenerasyon işleminin geliştirilmesi✓ “Döner Dolgulu Kolon” tipinde absorpsiyon kolonu ve Sıyırıcı (Stripper) kolonu kullanılarak CO₂ giderimi✓ Yanma Öncesi/Yanma Sonrası ve Endüstriyel CO₂ tutulumu ticari tesis kurulumuna yönelik proses mühendislik tasarımlarının yapılması (front-end engineering)✓ Absorban çözeltinin viskozitesini azaltmaya yönelik katkı maddelerinin geliştirilmesi✓ Düşük uçuculuk ve düşük viskoziteye sahip yeni absorban çözeltilerin geliştirilmesi✓ Soğutulmuş amonyak ile ayırma✓ İyonik sıvılar ile ayırma✓ Enzimatik absorpsiyon sistemleri <p>2- Fiziksel Absorpsiyon:</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Viskozite, yoğunluk, buhar basıncı, CO₂ kapasitesi, CO₂ seçiciliği ve maliyeti gibi gerekli olan fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi✓ Uygulamaya göre sıcaklık, basınç ve gaz karışım oranları için çözücülerin optimize edilmesi,✓ Proses optimizasyonu
--	--	--

		<p>3- Fiziksel Adsorpsiyon Teknolojileri:</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Zeolit temelli CO₂ ayırma teknolojisi geliştirilmesi✓ Metal organik yapı (MOF) temelli adsorbanların geliştirilmesi✓ Karbon temelli adsorbanların geliştirilmesi <p>4- Kimyasal Adsorpsiyon Teknolojileri</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Katı amin temelli adsorbanların ve proseslerin geliştirilmesi✓ Alkali metal karbonat temelli adsorbanların ve proseslerin geliştirilmesi✓ Kalsiyum temelli adsorbanların ve proseslerin geliştirilmesi✓ Alkali seramik temelli adsorbanların ve proseslerin geliştirilmesi✓ MgO temelli adsorbanların ve proseslerin geliştirilmesi <p>5- Membran Teknolojileri</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Membran maliyetlerinin düşürülmesi,✓ CO₂ geçirgenliği ve seçiciliğini yüksek malzemelerin geliştirilmesi,✓ Yüksek sıcaklık veya basınç gibi çalışma koşullarına dayanıklı ve aynı zamanda ayırma verimi yüksek membran malzemelerinin geliştirilmesi,✓ Nem, kükürtlü bileşikler ve istenmeyen parçacıklar gibi
--	--	--

		<p>kirleticilere karşı dayanıklılığın artırılması,</p> <p>✓ kompozit membran malzemeleri arasındaki uyumluluğun artırılması</p> <p>6- Doğrudan atmosferden CO₂ yakalama teknolojilerinin geliştirilmesi</p> <p>7- Oksijenleme teknolojisi ve proseslerinin geliştirilmesi</p> <p>8- Kimyasal-döngü teknolojisi ve proseslerinin geliştirilmesi</p> <p>9- Kriyojenik distilasyon prosesinin geliştirilmesi</p> <p>10- Mikroalgler ile karbondioksit giderimi teknolojisinin geliştirilmesi</p>
--	--	---

Endüstriyel Baca Gaz Emisyonundan Sentetik Yakıtların ve Kimyasalların Üretimini Kolaylaştırmak İçin Hedeflenmesi gereken yenilikçi özellikler ve performans (Sorun alanları ve çözüm önerileri)

Ar-Ge ve Yenilik Konusu	Teknolojik Sorun Alanı	Çözüm Önerisi
Endüstriyel Baca Gaz Emisyonundan Sentetik Yakıtların ve Kimyasalların Üretimini Kolaylaştırmak İçin Yenilikçi ve Geri Dönüştürülebilir	Baca gazlarındaki CO ₂ 'nin tutma ve ayırma maliyetleri oldukça yüksektir (endüstriyel kaynağa bağlı olarak 50-75 USD/ton), bu nedenle elde edilen CO ₂ 'nin yararlı ürünlere geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanımı sürdürülebilir ve temiz ekonomi için son derece önemlidir. CO ₂ 'nin yararlı ürünlere dönüştürülmesi katalitik proseslerinde	CO ₂ 'nin yakıtlara dönüştürülmesi konusu; teknoloji geliştirme, düşük maliyetli yenilenebilir hidrojen üretimi için altyapı oluşturulması vb. konularının entegre bir yaklaşımını gerektirmektedir. Teknolojik açıdan, CO ₂ 'den yakıt, kimyasal, vb. yararlı ürünlerin üretim yöntemlerinin ticari uygulamalara dönüşümün hızının artırılabilmesi için, yüksek seçicilik ve aktiviteye sahip katalizörlerin ve bu doğrultuda

<p>Katalitik Prosesler</p>	<p>gözlenen sorunlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca CO₂'nin yararlı ürünlere dönüştürülmesi için katalitik proseslerde aşağıda özetlenmiştir.</p> <p>Kimyasal katalitik prosesler:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Düşük seçicilik - Katalizör inhibisyonu ve kararlılık problemleri - Reaksiyon ürünlerinin ortamından ayrılması reaktiflerin reaktöre geri döndürülmesi - Reaktörlerde tek geçiş başına düşük dönüşüm - Reaksiyon yan ürünlerinin (örneğin su) reaksiyonu yavaşlatması - Ekzotermik reaksiyon ve yüksek sıcaklığın kontrol edilmesindeki zorluklar <p>Elektrokimyasal katalitik prosesler:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uygun maliyetli, etkin ve seçici elektrokatalizör geliştirilmesindeki zorluklar - Elektrotlarda yüksek "overpotansiyel" sorunları nedeniyle istenmeyen yan reaksiyonlar - Gerilim kayıpları - Büyük elektrot alanı ihtiyacı - Genel olarak elektrokimyasal reaksiyon 	<p>maliyet-etkin proseslerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu açıdan yanda belirtilen sorunların çözümü için genel öneriler aşağıda verilmektedir.</p> <p>Kısa vadede öneriler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • CO₂ Dönüştürme Teknolojileri kapsamında katalizör/elektrokatalizör geliştirilmesi konusunda kamu ve özel sektör birlikte Ar-ge çalışmaları gerçekleştirmelidir. • CO₂ Dönüştürme Teknolojileri konusunda katalitik, elektrokatalitik özgün proses geliştirme, optimizasyon ve uygulama projeleri gerçekleştirilmelidir. • CO₂ dönüştürme teknolojileri ile elde edilen ürünlerin maliyetleri çok büyük oranda CO₂ tutma ve yeşil H₂ üretimi maliyetlerine bağlı olduğu için bu teknolojiler de geliştirilmeli ve olgunlaştırılmalıdır. <p>CO₂'den yakıt üretimi konusunda orta ve uzun vadede öneriler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pilot ölçek CO₂ Dönüştürme teknolojilerini kurulması ve faaliyete geçirilmelidir • Kurulan bu tesisler gerçek ortamda üretimlerin yapılarak
-----------------------------------	--	---

	<p>hızının yavaş olması nedeniyle katalizör yüzey alanının artırılması</p> <ul style="list-style-type: none"> - Difüzyon kısıtlamaları - Membran ömrünün düşük, maliyetlerinin yüksek olması - Elektrokatalizör deaktivasyonu <p>Biyokimyasal prosesler:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biyolojik sistemlerin (alg, mikroalg, vb.) safsızlıklara ve pH değerine olan duyarlılığı gibi kısıtlamalar - Biyokimyasal dönüşüm hızının yavaş olması - Biyokimyasal reaktörlerin (alg havuzlarının, vb) büyük hacim ihtiyaçları - Canlı organizmalarla çalışma zorlukları - Ürün ayırma ve saflaştırma zorlukları - Kurutma proseslerinin yüksek olması 	<p>proses optimizasyonu gerçekleştirilmelidir.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elde edilen bu pilot ölçek veriler ışığında öncü tesis/endüstriyel tesis tasarımlarının yapılarak kurulmalı ve çalıştırılmalıdır. • CO₂ kaynaklı ürünleri üretim maliyetlerini düşürülmesi için yeşil H₂ üretimi ile proses entegrasyonu sağlanmalıdır. <p>Diğer kullanım alanları,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desalinasyon, • Beton, agrega, çimento ve katkıları ve belli oranda su karıştırılarak hazırlanır. Su, çimentonun ve dolayısı ile betonun sertleşmesi için kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda betonun kürlenmesi için su yerine CO₂ kullanımı denenmektedir. 28 gün sonundaki dayanıma yaklaşık olarak 1,5 gün içerisinde ulaşılmaktadır. Amerika’da bir şirket CO₂ kürlenme ile prekast üretimi gerçekleştirmektedir. Kürlenme için 300 kg’a kadar CO₂ beton içerisinde tutulabilmektedir.
--	---	--

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Başta kimya, petrokimya ve farmasötük endüstrileri olmak üzere imalat sektörü oldukça fazla çeşitlilikte kimyasal maddeye proseslerinde geniş yer vermektedir. Hem organik hem de inorganik yapıda olan bu kimyasallar proseslerde doğrudan kullanılabilirdiği gibi çözelti haline getirilerek veya çeşitli ön hazırlık aşamaları sonrasında da kullanılanlar mevcuttur. Kimyasalların bir çoğu reaksiyona girdiklerinden yapısal olarak farklı bir forma dönüşür ve bir kısmı ürün yapısına dahil olur. Bunlar ürünle birlikte piyasaya çıkarken atıkla birlikte de geri gelirler ve o materyalin içerisinde bulunan herhangi bir element halen aynı maddedir. Diğer taraftan bazı kimyasallar proseste fonksiyonlarını yerine getirdikten sonra proses atıkları içerisinde kalıntı olarak bulunurlar ve yine bunlar da aslında atıkta bulunmakla birlikte halen aynı değerli materyaldir.

Solventlerde de benzer durum söz konusudur. Birçok solvent türü (halojenli, halojensiz, alkol, aromatik, alifatik vs) proseste çözücü görevini farklı amaçlarla yerine getirir. Örneğin bazı solventler malzeme yüzeyi temizleme görevini üstlenmiştir ve bu sebeple yüzeydeki tüm safsızlıklarla beraber, kirlenmiş bir şekilde sistemden ayrılır. Buna karşılık bu solventlerin uçuculuk özellikleri ve düşük kaynama veya buharlaşma ısıları sayesinde içindeki safsızlıklardan ayrıştırılıp tekrar saf formda elde edilme olanakları mevcuttur.

Sektörel üretimin çeşitliliği, ürünlerin çokluğu ve ayrıca bütün bunların doğal materyal (örn tarım ürünü, orman ürünü vb), petrol türevi ürünler ve hem de sentetik materyal gruplarını içermesi sayesinde kimyasal içerikli ve solvent içerikli atıklar ile proses kalıntıları önemli hammadde kaynaklarına dönüşmüştür. Diğer taraftan endüstriyel simbiyoz ve döngüsel ekonomi kavramlarının popüleritesinin artması ile hemen hemen her sektörün proses atıklarından kimyasal bileşenlerin kazanımı, kullanılmış solventlerin geri saflaştırılması ve hatta kullanılmış ürünlerin atık olarak toplanması sonrası bunlardan yararlı bileşen kazanımı 2000'li yıllardan beri üzerinde düşünülse de özellikle son yıllarda kaçınılmaz gereklilik olarak görülmektedir. Bu gerçekten hareketle son dönemlerde giderek artan araştırmalar yaşam döngüsü analizinde beşikten beşiğe ve beşikten kapıya yaklaşımlarına odaklanmıştır. Bu tür geri kazanım uygulamaları için başlıca problemler şöyle sıralanabilir: (a) enerji yoğun süreçler ve zayıf geri kazanım verimleri; (b) yukarı ve aşağı yönde çevrim dışı ve büyük solvent envanterleri; (c) büyük ölçekli kazanım sisteminin yüksek sermaye maliyeti ve mekansal zorlukları; (d) sıcaklığa duyarlı ürünler ve reaktifler, optimumun altında geri kazanım verimiyle sonuçlanan bazı proses güvenliği endişeleri.

Proses çeşitliliği ve ürün çeşitliliği dikkate alınarak, farklı sektörler ve ürünler için hem yerinde proses atıklarından, hem de kullanım sonrası atık olarak toplanan ürünlerden değerli bileşen kazanımı birçok Ar-Ge çalışması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Özellikle bu yaklaşıma entegre biçimde yeşil kimya prensiplerinin uygulanması önemli güncel beklentilerdendir. Materyalin geri kazanımı ama mümkün olan en az enerji sarfiyatı ile ve mümkün olan en az yardımcı malzemeyi tüketerek en fazla kazanımı sağlamak esastır ve farklı alanlardaki atıklar

için bunun sağlanması önemli Ar-Ge çalışmaları gerektirir. Bu Ar-Ge çalışmaları sonucunda optimizasyon yapılması beklenir. En yüksek saflıkta/kalitede kimyasal veya solventi, en düşük enerji tüketimiyle, en fazla sayıda yeşil kimya kriteri ile en düşük atık/artık bırakacak şekilde kazanırken kazanılan ürünün ve geliştirilen prosesin katma değerinin de yüksek olması sağlanmalıdır. Bu beklentilerin prosese veya ürüne bağlı olarak kapsamlı şekilde araştırıldığı yenilikçi ve yüksek performans sağlamaya yönelik Ar-Ge çalışmaları beklenmektedir. Geliştirilecek kazanım sisteminin teknolojik, ekonomik ve ekolojik açıdan fizibilitesinin sağlanması gereklidir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Dünyada gazlaşma piroliz uygulaması için THS:9, Katalitik piroliz uygulaması için: THS:7-9

Türkiye’de gazlaşma piroliz uygulaması için THS:9, Katalitik piroliz uygulaması için: THS:6

Altyapı, hidrojen ekonomisini sağlamak için kilit bir faktördür. Avrupa Birliğinde somut planlar ve projeler geliştirilmektedir. 2020 yılında bir grup Avrupalı gaz iletim sistemi operatörü tarafından başlatılan Avrupa Hidrojen Girişimi (the European Hydrogen Backbone-EBH), büyük ölçüde mevcut doğal gaz boru hatlarının yeniden kullanılmasına dayalı, özel bir hidrojen boru hattı ağ altyapısı önermektedir. EHB, enerji tedarikini ve enerji sistemi esnekliğini güvence altına alırken düşük CO₂ emisyonlu hidrojenin dağıtımının kolaylaştırılarak AB düzeyinde enerji ve endüstriyel sektörlerin karbondan arındırılmasını hedeflemektedir.

Yunanistan, son birkaç yıldır AB düzenlemelerine uygun olarak 2015 yılında “Ulusal Atık Yönetim Planı (ESDA)” ve daha sonra 2016 yılında “Ulusal Tehlikeli Atık Yönetim Planı (ESDEA)” ortaya koymuştur. Ulusal düzeyde atık yönetimine yönelik strateji, amaç ve eylemleri belirlemek amacıyla Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bu çalışmaları yürütmektedir⁴.

1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

Dünyada ham petrolden kimyasal üretimi için THS:7, Türkiye’de THS:4’dir.

⁴ Rekos, K. C., Charisteidis, I. D., Tzamos, E., Palantzas, G., Zouboulis, A. I., & Triantafyllidis, K. S. (2022). Valorization of Hazardous Organic Solid Wastes towards Fuels and Chemicals via Fast (Catalytic) Pyrolysis. *Sustainable Chemistry*, 3(1), 91-111.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ham petrolden kimyasal üretimi (COTC) projeleri için Aramco, King Abdullah Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (KAUST) ile ortak çalışmaların devam ettiğini ve diğer COTC projelerinden farklı olarak çok fonksiyonlu katalizör ile tek aşamada petrolü kimyasallara dönüştürebileceklerini açıklamışlardır (TCGR-CAP raporu, 2020).

Türkiyede COTC projeleri için her hangi bir çalışma yapılmamaktadır.

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
-------	--------------------------	--------------------------

İleri kimya sanayiine sahip Avrupa, ABD ve Japonya’da bu alanda önemli Ar-Ge ve Ür-Ge faaliyetleri yürütülmektedir. Bu çerçevede;

- Çözücüsüz veya konsantre kimyasal üretim proseslerinin geliştirilmesi,
- Kimyasal proseslerde organik çözücüler yerine atık sınıflandırılması bakımından daha az zararlı çözücülerin (örn. su, dietil karbonat, dimetil karbonat, etilen karbonat) kullanılması,
- Geleneksel organik çözücüler yerine biyobazlı çözücülerin (2-MeTHF, CPME, 4-MeTHP) kullanılması,
- Mekanokimyasal yöntemlerin geliştirilmesi

gibi konularda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemlerle çözücü kaynaklı “zararlı ya da tehlikeli” atık oluşumu belli bir dereceye kadar minimize edilmektedir. Bunun yanında son yıllarda,

- Fotokimyasal
- Elektrokimyasal
- Organokatalitik

Üretim tekniklerindeki ciddi gelişmelerle üretimde kullanılan kimyasal girdilerin “geleneksel yöntemlere göre” azaltılması ve daha az zararlı kılınması bakımından önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Söz konusu çalışmaların sonuçlarının sanayiye yakın zamanda aktarılacağı tahmin edilmektedir. Bu çalışmalarda kritik bileşenlerden biri katalizör olup, bu çalışmaların desteklenmesi önem arz etmektedir.

1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hidrojen Enerjisinin Küresel Uygulamaları

Son dönemde hidrojen stratejilerinin daha çok önem kazanmasında ve ülkelerin kendi ulusal hidrojen stratejilerini ve yol haritalarını oluşturmaya başlamasında ülkelerin sera gazı emisyonlarını azaltma, enerjide arzı güvenliği ve ekonomik büyüme hedefleri öne çıkmaktadır. 2050 yılına kadar büyük ölçüde karbondan arındırılmış bir dünya hedefiyle, ülkelerin hidrojen kullanımında yalnızca yenilenebilir enerjiden elde edilen yeşil hidrojene yöneleceği değerlendirilmektedir.

Başlıca Ülkelerin Hidrojen Girişimleri

Almanya 2020 yılında “Ulusal Hidrojen Stratejisi”ni yayınlamıştır. Bu kapsamda Almanya, hidrojeni geleceğin sürdürülebilir enerjisi olarak hayata geçirmek için 9 milyar Avroluk yatırım yapmayı planlamaktadır. Özellikle sera gazı emisyonunun azaltılmasını, elektrifikasyonu zor olan çeşitli nihai kullanıcı sektörlerin birleştirilmesi ve yenilenebilir enerji arzının entegrasyonunu temel hedefler olarak belirlenmiştir. Strateji çerçevesinde, sınırlı yenilenebilir enerji potansiyeli nedeniyle, Almanya’daki uzun vadeli talebi karşılamak için hidrojen ithalatının gerekli olacağı belirtilmektedir. Bununla birlikte, yerli hidrojen talebinin ve üretim yeteneklerinin desteklenmesi, hidrojen ekonomisinin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak nitelendirilmektedir. Almanya halihazırda, tüketicilerin yoğunlukla kimya endüstrisi (amonyak

ve metan üretimi) ve rafinerilerden oluştuğu ve üretiminin çoğu fosil yakıtlara dayalı olan büyük sayılabilecek bir hidrojen pazarına sahiptir.

Japonya, 2019 yılında yayınladığı “Hidrojen ve Yakıt Hücreleri için Stratejik Yol Haritası” ile hidrojen toplumuna geçişi öne çıkarmaktadır. Japonya'nın ilk hidrojen toplumunu yaratmaya olan ilgisi, “güvenlik” öncülüğünde “enerji güvenliği”, “ekonomik verimlilik” ve “çevre” uygunluğunu artıran “3E+S” enerji politikası ile yakından ilişkilendirilmektedir. Bu politika, Japonya'daki enerji kaynaklarının yetersizliği, yüksek düzeyde enerji ithalatı bağımlılığı nedeniyle ortaya çıkan yapısal kırılabilirliği ve sera gazı emisyonlarını azaltma taahhütlerini ele almaktadır. Japonya 2030 yılına kadar yıllık 300.000 ton hidrojen ithalatı planlamakta ve 2030'dan itibaren, uluslararası hidrojen tedarik zincirlerini genişletmeyi ve büyük ölçekli hidrojen enerjisi üretimini hedeflemektedir.

Güney Kore 2019 yılında, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojisi açısından ana hedeflerin ve sektör hedeflerinin belirlendiği “Kore Hidrojen Ekonomisi Yol Haritası”nı ve “Hidrojen Teknolojisi Geliştirme Ulusal Yol Haritası”nı yayınlamıştır.

Bugün dünyadaki en büyük hidrojen üreticisi ve kullanıcısı konumunda olan Çin, Nisan 2020'de Enerji Yasasını “Hidrojen Enerjisini” de kapsayacak şekilde genişletmiştir. Çin, hidrojen üretiminde kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil enerjilerin kullanımı azaltarak güneş ve rüzgâr enerjileri gibi yenilenebilir kaynaklara odaklanacağını açıklamıştır.

AB ülkeleri arasında “Hidrojen Enerji Ağı” platformu kurulmuştur. 28 AB üyesi ülke, yaklaşık 100 işletme, çeşitli kurum ve kuruluşların yanı sıra sürdürülebilir hidrojen teknolojisi konusunda iş birliğini teşvik eden Linz Deklarasyonu “Hidrojen Girişimi”ni imzalamıştır. Avrupa Komisyonu'nun “İklim Nötr Bir Avrupa İçin Hidrojen Stratejisi” Temmuz 2020'de yayınlanmıştır. Strateji çerçevesinde 2050 yılına kadar karbon nötr hedefine ulaşmak için Avrupa enerji sisteminin gereklilikleri ele alınmakta olup hidrojen ve hidrojen bazlı sentetik yakıtlar, halihazırda enerji sistemi entegrasyon stratejisinin ilgili bir unsuru olarak değerlendirilmektedir. Avrupa Hidrojen Stratejisi, özellikle iki önemli nihai kullanıcı sektörler olan taşımacılık ve sanayinin yanı sıra elektrolize dayalı hidrojen üretimine odaklanmaktadır. Taşımacılık sektöründe, otobüs, kamyon, tren, gemi ve havacılık gibi ağır hizmet uygulamalarına odaklanılırken sanayi sektöründe, rafinerilerde ve ayrıca amonyak ve metan üretiminde karbon yoğun hidrojenin kullanımının değiştirilmesi ön plana çıkarılmaktadır. Ayrıca çelik üretiminin karbon yoğunluğunun azaltılması ve sıfır karbonlu çelik üretimi hedeflenmektedir. Ticari binalar ve konutları ısıtmak için hidrojenin yanı sıra mevsimsel enerji depolama ve yedek enerji kaynağı olarak hidrojenin kullanımı da stratejide ele alınmaktadır. Bunların yanında, kısa ve orta vadede daha düşük karbonlu hidrojen üretimi teknolojilerine olan ihtiyaç vurgulanmaktadır. Hollanda, 2020 yılında hidrojen yol haritası yayınlamış ve Hollanda İklim Anlaşması'na hidrojenle ilgili bölüm dahil edilmiştir. Elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretiminin 2025 yılına

kadar yaklaşık 500 MW kurulu güce ve 2030 yılına kadar 3-4 gigavata (GW) çıkarılması planlanmaktadır.

Fransa, 2018 yılında yayınladığı “Hidrojen Dağıtım Planı” çerçevesinde 100 milyon Avroluk finansman ile sanayi, ulaşım ve yenilenebilir enerji depolama alanlarında düşük karbonlu hidrojen için 2023 ve 2028 hedeflerini açıklamıştır. Dağıtım planının ana hedefi, Fransa'daki sera gazı emisyonunun azaltılmasına yardımcı olmak ve yenilenebilir elektrik arzını, esas olarak hidrojen depolama ve “Power-to-Gas” teknolojisi tarafından sağlanan ek hizmetler yoluyla enerji sistemine entegre etmektir.

Birleşik Krallık'ın özel bir resmi hidrojen stratejisi bulunmamakta, hidrojenin rolü iklim ve sanayiyle ilgili farklı politika girişimleri ve strateji belgeleri çerçevesinde tartışılmaktadır. Hidrojen faaliyetleriyle ilgili ana hedef, sera gazı emisyonunu azaltarak ve yenilenebilir enerjiyi enerji sistemine entegre ederek çevrenin korunması olarak belirlenmiştir. Bu şekilde, hidrojenin uzun vadeli dekarbonizasyon hedeflerine ulaşmada yardımcı olması beklenmektedir. Ayrıca, finansman programları, sanayiye ve topluma ekonomik faydalar sağlayabilecek hidrojen teknolojilerinin gelişimini desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu yönde oluşturulan hedefler doğrultusunda Birleşik Krallık doğal gaz şebekesinin bir bölümünde %20'ye kadar hidrojeni harmanlamayı planlamaktadır.

Kasım 2019'da açıklanan Avustralya Ulusal Hidrojen Stratejisi, hidrojenin ticarileştirilmesini hızlandırma, ulusal bir üretim ve tedarik zinciri oluşturma ile iç talebi teşvik etme planını ortaya koymaktadır. Avustralya'da 100 milyon Avustralya doları üzerinde bir desteğin hidrojen araştırmaları ve pilot projeleri desteklemek için kullanılmasına ilişkin karar alınmıştır. Özellikle önemli seviyede yenilenebilir enerji kapasitesine sahip Güney Avustralya, güneş ve rüzgâr gücünden hidrojen üretimi açısından ideal bir bölge olarak değerlendirilmektedir.

Rusya, Haziran 2020'de, “Enerji Stratejisi”ni sunmuştur. Söz konusu stratejide hidrojen üretiminde ve ihracatında dünya lideri olmanın amaçlandığı açıklanırken ihracat hedefi 2024 yılında 0,2 milyon ton ve 2030 yılında 2 milyon ton olarak belirlenmiştir. Ayrıca, Ekim 2020'de, 2020-2024 dönemi için “Rusya'da Hidrojen Enerjisinin Geliştirilmesi” yol haritası onaylanmıştır. Rusya'da hidrojen hâlihazırda endüstriyel ölçekte üretilmekte ve özellikle petrokimya ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkeler nezdinde oluşturulan stratejiler ve yol haritalarının yanı sıra hidrojen uygulamalarına hedefler dâhilinde ve hedeflerden bağımsız olarak teşvikler de sağlanmaktadır. Ülke bazında hidrojen uygulamalarına sağlanan desteklerin ağırlıklı olarak ulaşım sektörüne yoğunlaştığı görülmektedir.

Hidrojen Alanında Öne Çıkan Projeler ve Uygulamalar

Hidrojen stratejisi bulunan ülkelerin tamamına yakınında hidrojen yakıtlı araçlar ve hidrojen yakıt ikmal istasyonlarına ilişkin kısa, orta ve uzun vadeli hedefler yer almaktadır. 2020 yıl sonunda, dünya çapında 577 hidrojen yakıt ikmal istasyonu mevcuttur. Bu alanda Japonya

142 istasyonla lider konumda iken, onu 101 istasyonla Almanya ve 73 istasyonla ABD izlemektedir. Kara taşıtlarının yanında hidrojenin diğer ulaşım araçlarında da kullanımı artış göstermektedir. 2018 yılsonunda, Alstom tarafından üretilen hidrojenli tren Almanya'da faaliyete geçmiş ve 2021 yılında 14 tane daha hidrojen ile çalışan trenin faaliyete geçeceği duyurulmuştur. Birleşik Krallık ve Hollanda da Alstom'ın hidrojenli trenlerini faaliyete geçirmeye başlamıştır. Ayrıca Çin Foshan'da, hidrojen yakıt hücresiyle çalışan tramvay faaliyete geçmiştir. Deniz taşımacılığında hidrojen yakıtlı araçlar henüz yaygın olmasa da Belçika'da hâlihazırda denizcilikte içten yanmalı motorlarda hidrojeni dizel ile birlikte yakan bir proje bulunmaktadır. Norveç'te ise hidrojenle çalışan feribot ve gemilerin geliştirilmesi için fon sağlanmaktadır. Ulaşıma ek olarak, evsel ve endüstriyel ısıtma ve doğal gazın kullanıldığı alanlar, düşük karbonlu hidrojen talebini artıracak sektörler olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda hidrojen alanının farklı boyutlarını da ele alan özel sektör yatırımları ve teşvikler bulunmaktadır.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

CO₂ Tutma Teknolojileri

Endüstriyel atık gazdan CO₂'yi ayırma veya tutma teknolojileri uzun yıllardır kullanılmaktadır. En gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan tutma teknolojileri, kimyasal absorpsiyon ve fiziksel ayırmadır. Diğer teknolojiler, kimyasal döngü veya kalsiyum döngüsü ile membranları vb. prosesleri içermektedir [5, 6]

2019 yılı verilerine göre küresel olarak yaklaşık 230 Mt CO₂/yıl, gübre üretmek (yaklaşık 125 Mt/yıl) ve gelişmiş petrol geri kazanımı (EOR) için kullanılmaktadır. CO₂'nin diğer ticari kullanımları arasında yiyecek ve içecek üretimi, soğutma, su arıtma ve seralar bulunmaktadır [4, 5, 6, 7].

Bugün, yaklaşık 70-80 milyon ton/yıl insan kaynaklı CO₂, EOR için kullanılmaktadır [7]. EOR konusunda; köklü uygulama, ticaret ve hukuk yapısı vardır ve teknoloji olgunlaşmıştır.

Karbon tutma ve depolama (CCS) uygulamaları ülkeler ve bölgeler arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir. "Uluslararası Enerji Enstitüsü" "Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosu"nda Çin'in, 2070 yılına kadar kümülatif olarak yakalanan tüm CO₂'nin yaklaşık dörtte birini oluşturan en büyük CCS uygulamalarına sahip olacağı öngörülmektedir. CCS faaliyeti için diğer iki önemli bölge olan Avrupa ve Kuzey Amerika'da tutma kapasitesinde büyük bir artış görülmektedir. 2030'dan itibaren Asya'nın diğer bölgelerinde, özellikle Hindistan ve Orta Doğu'da önemli ölçekte CCS tesislerinin kurulması planlanmaktadır [2, 3, 4, 7, 8].

Mevcut durumda ABD, yeni politika teşvikleri ve destekleyici bir yatırım ortamı ile küresel CO₂ tutma kapasitesinin %60'ından fazlasını ve planlanan tüm kapasitenin yarısını oluşturacak şekilde CCS'ta küresel liderdir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki sabit emisyon kaynaklarının çoğu, potansiyel jeolojik depolama sahalarının yakınında yer almaktadır. Toplam potansiyel kapasitenin 800 Gt veya 160 yıllık mevcut ABD enerji sektörü emisyonlarını depolayacak kapasitede olduğu tahmin edilmektedir [3, 4, 5, 6, 7].

Kuzey Denizi, Avrupa'daki CCS uygulamalarının merkezinde yer almaktadır. Burada hâlihazırda 1.7 MtCO₂/yıl depolayan iki tesis bulunmakta ve Avrupa'da yaklaşık 30 Mt/yıl toplam kapasiteye sahip en az 11 başka proje geliştirilmektedir. Elektrik üretimi ve endüstriden kaynaklanan emisyonların yaklaşık %70'i, potansiyel bir depolama sahasının 100 km yakınında ve %50'si 50 km içersinde yer almaktadır. Toplam depolama kapasitesinin 300 Gt kadar (yaklaşık 80 yıllık kapasite) olduğu tahmin edilmektedir [3, 4, 5, 6, 7].

CO₂'nin Katalizörler ve Katalitik Proseslerle Dönüştürme Teknolojileri

CO₂ bazlı ürünlerin üretimi ve ticarileştirilmesi konusunda bazı önemli zorluk ve darboğazlar bulunmaktadır. Bunlar:

- CO₂ tutma maliyetleri yüksektir.
- Kararlı CO₂ molekülünü yararlı bir kimyasala dönüştürmek için gerekli yenilenebilir enerji daha pahalıdır.
- CO₂ molekülünü dönüştürmek için hidrojen gazı kullanıldığında, hidrojenin (fossil kaynaklardan üretilmeyen) maliyeti yüksektir.

Bilim ve teknoloji alanında yeni araştırmalar, girişimler ve iş birlikleri aşağıda verilen konu başlıkları çerçevesinde ilerlemektedir:

- Yeni katalizörlerin geliştirilmesi ve CO₂ dönüşüm süreçleri daha verimli hale getirilmesi,
- CO₂'ye güç sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş veya rüzgâr enerjisi) kullanılması. Yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin maliyetindeki azalma,
- Yapı malzemeleri üretmek için mineralizasyon teknolojileri,
- CO₂'nin fotokatalitik indirgenmesi ve bu dönüşümde gün ışığını doğrudan kullanan teknolojiler,

CO₂'nin dönüştürülmesi/tekrar kullanımı konusunda çalışan kuruluşların genel olarak odaklandığı altı uygulama alanı ve hedeflenen ürünler aşağıda özetlenmektedir [7].

- Algler (biyoyakıt veya gıda katkı maddeleri)
- Yapı malzemeleri (karbonatlara dönüştürme veya CO₂'nin malzemelere entegrasyonu)
- Kimyasal ara ürünler (metanol, sentez gazı, formik asit ve malik asit vb.)
- Yakıtlar (esas olarak metan ve alkol)
- Yeni malzemeler (karbon fiber vb.)

- Polimerler (polikarbonatlar, poliüretan, PHA vb.)

Yukarıda belirtildiği gibi, baca gazlarındaki CO₂'nin tutma ve ayırma maliyetleri oldukça yüksektir (endüstriyel kaynağa bağlı olarak 50-75 USD/ton), bu nedenle elde edilen CO₂'nin yararlı ürünlere geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanımı sürdürülebilir ve temiz ekonomi için son derece önemlidir. CO₂'nin yararlı ürünlere dönüştürülmesi katalitik proseslerinde gözlenen sorunlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca CO₂'nin yararlı ürünlere dönüştürülmesi için katalitik proseslerde mevcut durum Tablo 1'de özetlenmiştir.

Kimyasal katalitik prosesler:

- Düşük seçicilik
- Katalizör inhibisyonu ve kararlılık problemleri
- Reaksiyon ürünlerinin ortamından ayrılması reaktiflerin reaktöre geri döndürülmesi
- Reaktörlerde tek geçiş başına düşük dönüşüm
- Reaksiyon yan ürünlerinin (örneğin su) reaksiyonu yavaşlatması
- Ekzotermik reaksiyon ve yüksek sıcaklığın kontrol edilmesindeki zorluklar

Elektrokimyasal katalitik prosesler:

- Uygun maliyetli, etkin ve seçici elektrokatalizör geliştirilmesindeki zorluklar
- Elektrotlarda yüksek "overpotansiyel" sorunları nedeniyle istenmeyen yan reaksiyonlar
- Gerilim kayıpları
- Büyük elektrot alanı ihtiyacı
- Genel olarak elektrokimyasal reaksiyon hızının yavaş olması nedeniyle katalizör yüzey alanının artırılması
- Difüzyon kısıtlamaları
- Membran ömrünün düşük, maliyetlerinin yüksek olması
- Elektrokatalizör deaktivasyonu

Biyokimyasal prosesler:

- Biyolojik sistemlerin (alg, mikroalg, vb.) safsızlıklara ve pH değerine olan duyarlılığı gibi kısıtlamalar
- Biyokimyasal dönüşüm hızının yavaş olması
- Biyokimyasal reaktörlerin (alg havuzlarının, vb) büyük hacim ihtiyaçları
- Canlı organizmalarla çalışma zorlukları
- Ürün ayırma ve saflaştırma zorlukları
- Kurutma proseslerinin yüksek olması

Tablo 1. 2. CO₂'den yararlı ürünlerin üretilmesi süreçlerinde mevcut Teknoloji Hazırlık Seviyeleri (THS)

Ürün	Süreç/reaksiyon/yöntem	THS
Asetik asit	CH ₄ ve CO ₂ 'ten sentez	3
Akrilik asit	Etilen ve CO ₂ 'ten sentez	3
Kalsiyum karbonat	Mineral karbonatlaşma	7
Karbamatlar	Organik sentez	1-3
	CO ₂ 'in elektrokimyasal indirgenmesi	1-2
Siklo karbonatlar	Oksit epoksit ve CO ₂ 'den sentez	8-9
Dimetil karbonat (DMC)	Metanol ve CO ₂ 'den sentez	4-5
Dimetil eter (DME)	CO ₂ 'in hidrojenasyonu	1-3
Kuru alg tozu	Mikroalg ile CO ₂ dönüşümü	7-8
Etanol	CO ₂ 'in mikrobiyal dönüşümü	6-7
	CO ₂ 'in elektrokimyasal indirgenmesi	1-2
	CO ₂ 'nin hidrojenasyonu	1-2
Etilen Glikol	CO ₂ 'nin foto elektrokimyasal indirgenmesi	4
Formaldehit	Elektrokimyasal indirgeme	1-3
	CO ₂ 'in foto elektrokimyasal indirgenmesi	1-3
	CO ₂ 'in hidrojenasyon	1-2
Formik asit	CO ₂ 'nin elektrokimyasal indirgenmesi	6
	CO ₂ 'nin foto elektrokimyasal indirgenmesi	4
	CO ₂ hidrojenasyonu	3
İzosiyanatlar	Organik sentez	1-3
Laktonlar	Organik sentez	4
Magnezyum karbonatlar	Mineral karbonatlaşma	3-4
Metan	CO ₂ /CO ₂ metanasyonunun hidrojenasyonu	7
	CO ₂ 'nin elektrokimyasal indirgenmesi	4
	CO ₂ 'nin mikrobiyal dönüşümü	3-4
	CO ₂ 'nin foto elektrokimyasal indirgenmesi	3
Metanol	CO ₂ hidrojenasyonu	8-9
	CO ₂ 'nin elektrokimyasal indirgenmesi	1-3
	CO ₂ 'nin foto elektrokimyasal indirgenmesi	1-3
Polikarbonatlar	Organik sentez	9
Polioller	Epoksit ve CO ₂ 'den organik sentez	8-9

Poliüretanlar	İki aşamalı sentez: Epoksit ve CO ₂ 'den poliollerin sentezi; Poliollerden ve izosiyanatlardan poliüretan sentezi	8-9
Salisilik asit	Fenol ve CO ₂ 'den organik sentez	9
Sodyum bikarbonat	Mineral karbonatlaşma	8-9
Sodyum karbonatlar	Mineral karbonatlaşma	6
Sentez gazı	CH ₄ 'ün kuru reformasyonu/CO ₂ reformasyonu	6
	CO ₂ ve H ₂ O'nun birlikte elektrolizi	4-5
	CO ₂ ve H ₂ O'nun termokimyasal dönüşümü	3-4
Üre	Organik sentez	9

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Dünyada

- Solvent kazanımı için THS: 5-9
- Diğer kimyasallar ve atıktan bileşen kazanımı için THS: 3-5

Türkiye’de

- Solvent kazanımı için THS: 4-9
- Diğer kimyasallar ve atıktan bileşen kazanımı için THS:3-4

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Temel petrokimyasalların organik bazlı atık materyallerden üretiminde biyojenik (biyokütle) ve biyojenik olmayan karbonlu atıklar kullanılmaktadır.

1) Biyojenik atıklardan üretim

Biyojenik atıklardan olefinler (etilen, propilen), BTX ve CH₃OH alternatif teknolojilerle üretilmektedir.

a) Gazlaşma teknolojisi

Gazlaştırma, karışık atık malzemelerin sınırlı miktarda oksijen varlığında çok yüksek bir sıcaklığa (> 900 °C) ısıtıldığı ve sentez gazı (H₂,CO) üretiminin gerçekleştirildiği termokimyasal

bir prosestir. Sentez gazı daha sonra yakıt ve gübrenin yanı sıra plastik üretimi için çeşitli kimyasallar (örneğin metanol, amonyak, hidrokarbonlar, asetik asit) üretmek için ara girdi olarak kullanılmaktadır. Gazlaştırmanın ekonomik olması için büyük ölçekte gerçekleştirilmektedir. Gazlaştırma prosesinde nemi gidermek ve kalorifik değeri artırmak için atıklara ön işlem uygulanmaktadır. Sentez gazının kimyasal üretime uygun saflığa ve bileşime getirilmesi için kompleks gaz şartlandırma, ayırma ve temizleme sistemlerine gereksinim bulunmaktadır.

CO ve H₂ zengin karışımdan aşağıda verilen yöntemlerle petrokimya girdisi olan olefinler üretilmektedir;

- Metanol sentezi ve metanolden olefin üretimi
- Fischer-Tropsch sentezi ile biyo-nafta üretimi ve biyo-naftadan parçalama reaksiyonu ile olefinlerin üretimi
- Fischer-Tropsch sentezi ile doğrudan olefin üretimi

b) Termo-Katalitik Biyokütle Dönüşümü ile BTX üretimi

Bio-TCat teknolojisi: Silsbee, Teksas'taki TCat-8® pilot fabrikasında kağıt hamuru hammaddeleriyle demonstrasyon gösterimi bulunmaktadır. South Hampton Resources (SHR) kimyasal üretim tesisi içinde faaliyet göstermektedir. 5000 saatten fazla çalışma yapılmıştır. (<https://anellotech.com/bio-tcat>)

c) Biyoetanol dehidrasyonu ile etilen üretimi

Şirket	Konum	Devreye Alma	Üretim hacmi (kton/y)
Braskem	Triunfo Petrochemical Complex (Brezilya)	2010	200

(<https://biorrefineria.blogspot.com/2020/05/biobased-polyolefins-biobased-Polyethylene-bio-PE.html>)

(<https://biokunststofftool.de/materials/bio-pe/?lang=en>)

d) Atık yağların hydrotreatingi ile elde edilen biyo-naftadan parçalama reaksiyonu ile olefinlerin üretimi.

Şirket	Konum	Devreye Alma
LyondellBasell (Neste'den Biyo-nafta ile)	Wesseling (Almanya)	2019
Total	LA Mede (Fransa)	2019

Dow (UPM Biofuels'den Biyo-nafta ile)	Terneusen (Hollanda)	2019
Ineos (UPM Biofuels'den Biyo-nafta ile)	Köln (Almanya)	2020

(<https://biorrefineria.blogspot.com/2020/05/biobased-polyolefins-biobased-Polyethylene-bio-PE.html>)

2. Biyojenik olmayan atıklardan üretim

a) Gazlaşma teknolojisi

- CH₃OH sentezi
- Fischer- Tropsch sentezi ile nafta üretimi ve naftadan parçalama reaksiyonu ile olefinlerin üretimi.

Örnekler;

Shell Gazlaştırma Prosesi (SGP), düşük değerli ağır rafineri ürünlerinin sentez gazına dönüşümü ve sentez gazından hidrojen ve petrokimyasalların üretimi. Günümüzde, 96 gazlaştırma reaktörü çalışmaktadır.

(http://www.chemwinfo.com/private_folder/Uploadfiles2018_January/Air_Shell_Residue_Gasification_Sh.pdf)

(<https://www.shell.com/business-customers/catalysts-technologies/licensed-technologies/refinery-technology/gasification-technology.html>)

1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

Çin, 2019 ve 2020 yıllarında kimyasal üretimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla üretim kapasitesinin %40'ına kadar, öncelikle poliester üretiminde kullanılacak para-ksilen (PX) olmak üzere yılda 20 milyon varillik Hengli ve Zhejiang rafinerilerini kurmuştur. Hengli rafinerisinin 3,9 milyon tonluk kimyasal üretimine ek olarak yılda 4,34 milyon ton PX üretmesi planlanmıştır. İki fazdan oluşan Zhejiang rafinerisinde ise sadece ilk fazın tamamlanmasıyla 4,0 milyon ton PX, 1,4 milyon ton benzen, 1,4 milyon ton etilen ve diğer alt petrokimya ürünleri üretilmesi beklenmektedir (IHS Markit-COTC raporu, 2019).

Hengli Petrochemical ve Zhejiang Petroleum şirketlerinin yanı sıra Hengyi, Shenghong ve Aramco/SABIC şirketleri de rafineride maksimum kimyasalların elde edilmesi ve aynı zamanda rafinerilerinde bulunan buhar kraking ünitesi için maksimum besleme yapmak amacıyla yeni rafineri konfigürasyonuna başlamışlardır (Şekil 1.4). Bu projelerde bir varil petrolün kimyasallara dönüşümü yaklaşık %40-60'tır. Aramco ayrıca bir varil petrolün %60'ından fazlasını kimyasallara dönüştürmeyi amaçlayan 'Catalytic Crude to Chemicals (CC2C™)'

teknolojisini hızlandırmak ve ticarileştirmek için Axens ve TechnipFMC ile ortak bir geliştirme ve işbirliği anlaşması imzalamıştır (IHS Markit-COTC raporu, 2019).

Project	Refinery Capacity (MMTPA)	P-Xylene Capacity (MMTPA)	Olefin Capacity (MMTPA)	Est. Chemical conversion/ bbl of oil (%)	Investment (\$bn)	Start Trial Operation
Hengli Petrochemical	20	4.3	1.5	42	11.4	Dec 2018
Zhejiang Petroleum and Chemical (ZPC) Phase 1	20	4.0	1.4	45	12	Est. Q2 2019
Hengyi (Brunei) PMB Refinery-Petrochem	8	1.5	0.5	>40	3.45	Est. 2019
Zhejiang Petroleum and Chemical (ZPC) Phase 2	20	4.8*	1.2	50*	12	Est. 2021
Shenghong refinery and Integrated Petrochem	16	2.8	1.1	60**	11.0	H2** 2021
Aramco/SABIC JV	20	--	3.0	45	20	2025

Şekil 1.4. COTC teknolojisiyle çalışan rafineriler ve özellikleri (IHS Markit-COTC raporu, 2019)

Aramco/SABIC'in devam etmekte olan COTC JV projesine ek olarak Aramco, Chevron Lummus Global ve McDermott bir varil petrolün %70-80'ni kimyasallara dönüştürülmesini hedefleyen TC2C™ (Thermal Crude to Chemicals) teknolojisini büyütme ve ticarileştirmek için yeni anlaşmalar imzalamışlardır. Ayrıca COTC projeleri için Aramco, King Abdullah Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (KAUST) ile ortak çalışmaların devam ettiğini ve diğer COTC projelerinden farklı olarak çok fonksiyonlu katalizör ile tek aşamada petrolü kimyasallara dönüştürebileceklerini açıklamışlardır (TCGR-CAP raporu, 2020).

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Dünya'da özel sektör bünyesinde ya da kamusal olarak faaliyet gösteren çok sayıda katalizör araştırma enstitüsü bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir;

Heidelberg Üniversitesi ve BASF ortaklığında kurulmuş olan CaRLa (Catalysis Research Laboratory)

LIKAT (Leibniz Institute for Catalysis)

Katalizör Araştırma Enstitüsü (IRC-Lyon, Fransa)

Türkiye'de firma bazlı Ar-Ge birimlerinde bu alanda çalışmalar yapılmakla birlikte, sadece bu konuda uzmanlaşmış bir birim ya da enstitü Türkiye'de mevcut değildir.

1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

- Almanya'daki Amprion ve gaz ağı operatörü OGE, 2023 yılında devreye girmesi hedeflenen toplam 150 milyon euro tutarlı 100 MW'lık bir elektrolizör ve Almanya'nın kuzeybatısındaki özel bir hidrojen boru hattı için yatırım planı sunmuştur.
- VNG, Uniper, Terrawatt ve DBI tarafından Almanya'daki bir kimya kompleksinin yakınında, 50 milyar metreküp depolama alanı ve özel bir hidrojen boru hattı dahil olmak üzere, elektrolizörlerle birleştirilmiş 40 MW'lık bir rüzgâr santrali planlanmaktadır.
- ITM Power ve Linde ile oluşturulan konsorsiyum ile Shell'in Köln yakınlarındaki Wesseling rafinerisinde 10 MW'lık polimer elektrolit membran (PEM) elektrolizörü 2020 yılında devreye alınmıştır.
- Almanya Araştırma Bakanlığı Ocak 2021'de, büyük elektrolizörlerin üretimine, deniz üstü rüzgâr santralleri ile hidrojen üretiminin birleştirilmesine ve hidrojenin taşınmasına odaklanan yeşil hidrojen üzerine üç büyük ölçekli araştırma projesine toplam 700 milyon euro destek verildiğini duyurmuştur.
- Japonya'nın Fukushima şehrinde, Toshiba tarafından 2018 yılından beri inşaatı devam eden yenilenebilir enerji ile çalışan 10 MW'lık hidrojen üretim ünitesi 2020 yılı Şubat ayında devreye alınmıştır. Ulaşım uygulamalarında kullanılmak üzere yenilenebilir kaynaklardan yılda 900 ton hidrojen sağlaması planlanmakta olup ünitenin ihtiyaç duyacağı elektriği 20 MW'lık bir güneşsantrali projesinden sağlayacağı belirtilmiştir.
- Japonya'nın desteğiyle Avustralya'nın Victoria Eyaleti'nde Hidrojen Enerjisi Tedarik Zinciri (HESC) projesi geliştirilmektedir. Proje kapsamında linyitin gazlaştırılarak hidrojene dönüştürülmesi ve üretilen hidrojenin Japonya'ya gönderilmesi amaçlanmaktadır. Pilot aşama Latrobe Vadisi'nde bir gazlaştırma tesisi ve Hastings Limanı'nda bir sıvılaştırma tesisi içermektedir. 500 milyon Avustralya doları (344 milyon ABD doları) maliyeti olması öngörülen projeye, Japon hükümeti ve Japon endüstrisi ile Avustralya ve Victoria hükümetlerinin her biri 50 milyon Avustralya doları finansman sağlamıştır. Tesisin, yılda 5.000 ton hidrojen ve 18.000 ton amonyak üretmesi hedeflenmektedir.
- Avustralya'nın Pilbara bölgesinde geliştirilen 15 GW kapasiteli güneş ve rüzgâr santrali yatırımları ile elde edilecek elektriğin öncelikli olarak yerel madencilik endüstrisinde kullanılması ve ayrıca elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için ihtiyaç duyulacak elektriğin de bu kapasiteden sağlanarak hidrojen ihracatı yapılmasının hedeflendiği belirtilmiştir.
- Hidrojen alanında önemli projeler arasında yer alan ve İngiltere'nin kuzeyindeki gaz şebekelerini 2028 ile 2034 yılları arasında hidrojene dönüştürmeyi amaçlayan H21 Kuzey İngiltere (H21 NoE) projesi Cadent, Equinor ve Northern Gas Networks ortaklığıyla geliştirilmektedir. Proje kapsamında 2035 yılına kadar Humber Haliçi'nde 12,5 GW'lık bir doğal gaz dönüştürme tesisi, 8 TWh'lık bir hidrojen gazı depolama tesisi, talebin yoğun

olduğu merkezlerde yeni hidrojen iletim boru hattı ve yıllık 20 milyon ton CO₂ depolama yer almaktadır.

- H-vision girişimi, Hollanda'nın Rotterdam limanındaki ilk potansiyel mavi hidrojen projesidir. Hedef, 2030 yılına kadar projenin tamamının gerçekleştirilmesi yönündedir. H-vizyon projesi, CO₂'yi Kuzey Denizi altında depolamak ve ardından hidrojeni limandaki sanayi kuruluşlarına ulaştırmak için saatte toplam 15-20 ton hidrojen kapasiteli dört buhar dönüştürme tesisini kapsamaktadır. İlk tesisin 2025 yılında açılması ve üretilen hidrojenin liman içine veya başka bölgelere taşınması planlanmaktadır.
- Fransa'da enerjiden gaza dönüştürme projesi olan Les Hauts de France projesi, beş yıllık bir süre içinde her biri 100 MW'lık beş hidrojen elektrolizör ünitesi inşa etmeyi hedeflemektedir. Exxon rafinerisinin yanında kurulacak Port-Jérôme tesisi, yakıtların kükürt gidermesi veya gübre üretimi için petrokimya endüstrisine (Exxon, Total, Yara vb.) hidrojen sağlamayı hedeflemektedir.
- Kanada'da Air Liquide şirketi, 2021 Ocak ayında hidroelektrik kullanarak düşük karbonlu hidrojen üretmek için 20 MW kapasiteye sahip dünyanın en büyük PEM elektrolizörünün açılışını yapmıştır.
- Danimarkalı Orsted, kuracağı 2 MW'lık tesiste deniz üstü rüzgâr enerjisi kullanarak günde 1.000 kg yeşil hidrojen üretmeyi planlamaktadır.
- British Petroleum (BP), sera gazı emisyonlarını azaltmak için İngiltere'nin kuzeyindeki tesisinde bölgesinde ülkenin en büyük hidrojen santralinin kurulmasının planlandığı duyurmuştur. Santralin faaliyete geçmesiyle 1 gigavat "mavi hidrojen" üretilmesinin hedeflendiğini belirtmiştir.
- Avrupa'ya Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP) üzerinden hidrojen taşınması için araştırma ve analiz çalışmalarını tamamladıklarını belirten SOCAR, boru hattının %20'sinin herhangi bir ek yatırım gerekmeksizin hidrojen taşımak için kullanılabileceğini belirtmiştir.
- Siemens Gamesa ve Siemens Energy, Paris Anlaşması çerçevesinde, gelecek dönemde dünyanın yüksek miktarda yeşil hidrojene ihtiyaç duyacağı ve yeşil hidrojen üretimi için gereken enerjinin büyük kısmının rüzgârdan sağlanacağı öngörüsüyle iş birliğine gideceklerini açıklamıştır. 5 yıl içerisinde Siemens Gamesa'nın 80 milyon Avro, Siemens Energy'nin ise 40 milyon Avro tutarında yatırım yapması planlanmaktadır.

Türkiye'deki Hidrojen Enerjisi Gelişmeleri

Türkiye, 2010'lu yılların başında İstanbul'da UNIDO öncülüğünde kurulan ICHET'i desteklemek suretiyle hidrojen araştırma ve geliştirmesini (Ar-Ge) artırmaya çalışmıştır. Bu kapsamda, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) da desteği ile 2011 yılında "Bozcaada Hidrojen Adası Projesi" gerçekleştirilmiştir.

Ekim 2011 tarihinde devreye giren proje ile Bozcaada Kaymakamlık binası ve sağlık ocağının elektrik ihtiyacı üretilen hidrojen ile karşılanmıştır. Buna rağmen projenin devamı getirilmemiştir ve hidrojen üretimi sonlandırılmıştır.

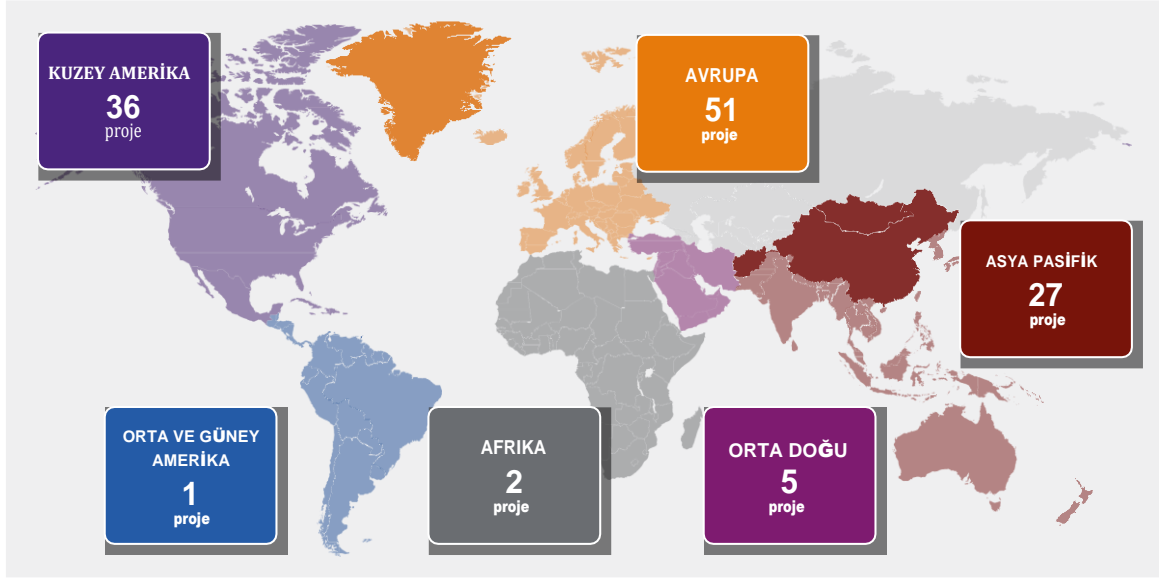
Hidrojen enerjisinin resmi belgelere ilk giriş tarihi olarak 2 Mayıs 2007 tarihi ön plana çıkmaktadır. Bu tarihte Resmi Gazete’de yayımlanan “Enerji Verimliliği Kanunu”nda hidrojen, biyoyakıt ile birlikte kullanımı özendirilmesi gereken alternatif yakıt olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 2011 yılında hidrojen yakıtlı araçlara ilişkin bir yönetmelik çıkarılmıştır. Söz konusu yönetmelikle, hidrojen yakıtıyla çalışan araçların tip onayına yönelik düzenleme yapılmıştır ve bu araçların bir süre sonra pazara gireceği beklentisiyle bir ön hazırlık gerçekleştirilmiştir.

15 Ocak 2020 tarihinde ETKB’nin düzenlediği “Hidrojen Arama Konferansı” ile kamuoyuna hidrojenin önemi aktarılmıştır. Toplantıda dağıtım hatlarına hidrojen enjeksiyonunun hedeflendiğini belirtilmiştir. Bu konuda bir proje ETKB tarafından Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği’ne (GAZBİR) verilmiştir. 2 Nisan 2021 tarihinde GAZBİR’in teknik merkezi GAZBİR-GAZMER Konya’da açılmış ve ilk defa doğal gazla hidrojen karıştırılarak evsel cihazların beslenmesi projesi hayata geçirilmiştir. Laboratuvarda test amaçlı olarak ortalama %5 ila 20 oranında hidrojen ile %95 ila 80 oranında doğal gaz karıştırılırken elde edilen karışım test amaçlı olarak yakılmıştır. Türkiye’de yürütülen doğal gaz sistemlerine hidrojen enjeksiyonu projesinin ilk sonuçlarına göre, doğal gaz iç tesisatlarında ve tüketici cihazlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmaksızın hidrojenin, dağıtım ağlarında doğal gazla birlikte en fazla %20 oranında karıştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

Karbon Tutma ve Dönüştürme Konularında Dünyadaki Önemli Projeler ve İşbirlikleri, İyi Uygulamalar

Başta Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Almanya, Avrupa Birliği ve Çin olmak üzere gelişmiş ülkeler karbon fiyatlarının getirilmesine dayanan çeşitli politikalar aracılığıyla CCUS teknolojilerini desteklemektedir. Küresel ölçekte mevcut ve planlanan CCUS uygulamalarının yerleri Şekil 1.5’de gösterilmektedir [8].



Şekil 1.5. Küresel ölçekte mevcut ve planlanan CCUS projelerinin bölgelere göre dağılımı [8]

ABD, CCUS teknolojisinin enerji üretimi ve endüstride sera gazlarının azaltılmasında önemli bir rol oynamasını beklemektedir. ABD, yaklaşık 8000 km uzunluğu ile yılda 69 milyon ton CO₂ taşıma kapasitesine sahip dünyanın en büyük CO₂ boru hattı altyapısına sahiptir [9]. ABD Enerji Bakanlığı (DOE) daha önce ulusal sera gazlarını azaltmak için stratejik teknolojiler olarak CCS ve CO₂-EOR'a bağlı kalmıştır. CCUS tamamlayıcı bir teknoloji olarak ortaya çıktığı için ulusal stratejik teknolojiye dahil edilmekte ve geliştirilmektedir. DOE destekli en büyük proje Skyonic'in projesidir. Skyonic, DOE'nin 25 milyon USD desteğiyle SkyMine adlı teknolojisi ile çimento fabrikalarından üretilen CO₂'yi kullanarak sodyum hidrojen karbonat üretmektedir [1, 2, 3, 4]. Ayrıca, Alcoa Center, DOE'den 12 Milyon USD fon sağlamıştır ve üretilen CO₂'yi bikarbonat veya karbonat ürünlerine dönüştürmekte ve bunları inşaat dolgu malzemeleri, yeşil gübre vb. üreten şirketlere vermektedir. Calera, DOE finansmanında 20 Milyon USD ile benzer teknolojileri kullanmak üzere California'da bir proje üzerinde çalışmaktadır. Novomer, Güney Louisiana'da CO₂'yi plastik ürünler için bir hammadde olan polikarbonata dönüştürmek için DOE'den sağlanan 18.5 Milyon USD ile bir demo projesi üzerinde çalışmaktadır [4, 6, 7, 9, 10].

G.Kore, Ağustos 2016'daki "İkinci Bilim ve Teknoloji Stratejisi Konferansı"nda CCUS'yu ulusal stratejik teknolojilerden biri olarak seçmiştir. CCUS ile sera gazlarının azaltılması ve yeni endüstrilerinin yaratılması için ayrıntılı bir yol haritası hazırlanmıştır [9, 10]. 2017 yılından bu yana, Bilim ve Bilişim Teknolojileri Bakanlığı (MSIT), Ticaret Sanayi ve Enerji Bakanlığı (MOTIE) ve Çevre Bakanlığı (ME), temsili bir CCU projesi olarak "Karbon Yeniden Kullanımı için Ulusal Stratejik Projesini" desteklemektedir. Kore Yerbilimi ve Maden Kaynakları Enstitüsü (KIGAM) deneysel araştırmalar yürütmektedir. Kore Yerbilimi ve Maden Kaynakları Enstitüsü

tarafından yürütülmekte olan “Karbon Yeniden Kullanımı için Ulusal Stratejik Projesi”nde “Karbon Mineralizasyonu” “Amiral Gemisi Projesi”dir [9, 11].

Güney Kore'nin CCUS ile ilgili bakanlıkları ve kurumları arasında MOTIE (Ticaret Sanayi ve Enerji Bakanlığı), MSIT (Bilim ve ICT Bakanlığı), ME, Okyanuslar ve Balıkçılık Bakanlığı (MOF), Eğitim Bakanlığı (MOE) ve Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İdaresi (MSS) bulunmaktadır. 2010'dan 2017'ye kadar, bu bakanlıklar CCUS ile ilgili projelere yaklaşık 3475 milyar KRW yatırım yapmıştır ve hükümet tarafından finanse edilen araştırma enstitüleri ve diğer ilgili kurumları 447 ulusal Ar-Ge projesi gerçekleştirmişlerdir [11]. MSIT ve MOTIE 388 proje yönetmiştir ve bu projeler için yaklaşık 295.4 milyar KRW yatırım yapmıştır.

Avrupa Komisyonu tarafından Aralık 2019'da açıklanan “Avrupa Yeşil Mutabakatı (Europe Green Deal)”, iklim ve çevre ile ilgili zorluklara karşı atılmış önemli bir adımdır. Bir araştırma ve yenilik programı olan Horizon Europe (2021-2027), Avrupa'nın temiz enerji teknolojilerinde rekabet avantajını koruması için önemli olacaktır. Horizon Europe'ta toplam proje bütçesinin en az %35'i, Avrupa Yeşil Anlaşması'nın uygulanmasıyla ilgili yeni çözümler üzerinde araştırma ve inovasyonu finanse edecek şekilde düzenlenmiştir [12, 13].

Temiz Enerji Geçiş Ortaklığı (CETP), Avrupa Stratejik Enerji Teknolojisi Planının (SET Planı) uygulanmasına katkıda bulunmak amacıyla Avrupa Üye Devletleri ve İlişkili Ülkelerdeki ulusal ve bölgesel Ar-Ge ve inovasyon programlarının çok taraflı ve stratejik bir ortaklığıdır. CETP'deki kritik hususlar: depolama teknolojileri, yenilenebilir yakıtlar, CO₂ tutma ve kullanım (CCU), CO₂ tutma ve depolama (CCS) ile iklim nötrlüğünü mümkün kılmak olarak belirlenmiştir [12].

Fransa'nın, enerji ve iklim politikası perspektifinde ulusal belgeler, CCS'nin potansiyel stratejik önemini vurgulamaktadır [14]. 2010 yılında, Ekoloji Bakanlığı CCUS'u hem Fransız hem de küresel pazarları hedefleyen yeşil ekonominin stratejik bir sanayi sektörü olarak tanımlamıştır. CCUS, 2016 yılında araştırma altyapıları için ulusal yol haritasına “proje” statüsüyle girmiştir. Bu yol haritası, CCUS pilot ve muhtemelen ticari birimlerin geliştirilmesini desteklemek için teknolojilerin geliştirilmesine ve benimsenmesine bir an önce başlamayı önermektedir. Amaç, sektörün ihtiyaçlarına uygun yerel kalkınma planları ve iş modelleri üreterek her bölgedeki girişimleri teşvik etmek ve desteklemektir.

Birleşik Krallık 2018'de CCUS hedefine ulaşmak için, hükümet ve endüstrinin ortaklaşa nasıl çalışabileceğini belirleyen bir eylem planı yayınlanmıştır. Bu belge, maliyetlerin yeterince düşmesine bağlı olarak, 2030'larda CCUS'u geniş ölçekte yaygınlaştırma hedefine ulaşmak için hükümet ve endüstrinin ortaklaşa atması gereken adımlar hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir [15, 16]. Birleşik Krallık tarafından Kasım 2020'de yayınlanan “Yeşil Sanayi Planı”nın 8. Maddesi, iki sanayi kümesi kurmayı hedeflemiştir ve 2030 yılına kadar Kuzey

Doğu, Humber, Kuzey Batı, İskoçya ve Galler gibi alanlarda da 4 küme hedeflemektedir. Bu kümelerde 2030 yılına kadar 10 Mt/yıl karbondioksit yakalanması hedeflenmiştir [17].

Japonya, önümüzdeki on yıllarda CCUS faaliyetlerinin ticarileşmesini, sosyal uygulamasını ve küresel genişlemesini teşvik etmeye odaklanmıştır. Örneğin, 2011'den beri, Japon mühendislik şirketi IHI Corporation, bir tür mikroalgden üretilen ve bio-jet olarak bilinen alternatif, yenilenebilir bir havacılık yakıtına odaklanmıştır. IHI, Japonya'nın Kagoshima Eyaletinde ve Tayland'ın Saraburi eyaletinde üretim için testler gerçekleştirmiştir. 2021'in ikinci yarısında şirket, uluslararası akredite yakıtını Japon havayollarına deneme uçuşları için tedarik etmeyi planlamıştır. IHI'deki yosun bazlı biyoyakıt grubunun amacı biyo-jeti ticarileştirmek ve 2030 yılına kadar makul fiyatlı bir havacılık yakıtı haline getirmektir. IHI, maliyetleri düşürmeyi, istikrarlı bir biyo-jet yakıtı tedariki sağlamayı ve hükümet, medya ve yatırımcılarla yakın çalışarak kamu bilincini artırmayı planlamaktadır.

Küresel bir entegre ticari kuruluş olan Mitsubishi Corporation, çimento kullanımını azaltabilen ve özel katkı maddesi içeren çevre dostu beton türü olan "CO₂-SUICOM"un (Beton Malzemelerle CO₂-Depolama) iş geliştirme ve pazarlamasını gerçekleştirmeye hazırlanmaktadır. Beton, enerji ve çelik fabrikalarından kaynaklanan karbondioksit emisyonlarını absorbe edecektir. Mitsubishi Corporation'daki CCU ekibi ve Doğal Gaz Grubu'na göre, CO₂-SUICOM teknolojisi ile üretilen beton, normal tiplerle eşdeğer veya daha yüksek dayanıma ve aşınma direncine sahiptir. Japonya, Enerji Ekonomisi Enstitüsü'nün (IEEJ) 2017 raporuna göre, tüm çimento üretiminin yerini CO₂-SUICOM alırsa, Japonya CO₂ emisyonlarını yılda yaklaşık 22 milyon t-CO₂ (toplam CO₂) azaltacağı öngörülmektedir.

Mitsubishi Heavy Industries Engineering (MHIENG), endüstride negatif emisyonların elde edilmesi için çalışırken, CO₂ tutma teknolojisinde araştırma ve geliştirmenin ön saflarında yer almaktadır. Şirket, elektrik, kimya ve çimento fabrikalarında yayılan çeşitli baca gazlarından CO₂'yi tutmak ve atmosfere salınmasını önlemek için KM CDR Process™ adlı bir proses kullanmaktadır. Geri kazanılan CO₂ daha sonra gübre ve kuru buz üretmek için kullanılabilir. MHIENG bugüne kadar dünya çapında toplam karbon tutma kapasitesi yılda 3 milyon tona eşdeğer 13 ticari karbon tutma tesisi kurmuştur. 2017'de MHIENG, büyük ölçekli bir geliştirilmiş petrol geri kazanımı (EOR) projesi olan Petra Nova Karbon Tutma Projesi'nin bir parçası olarak ABD'de dünyanın en büyük yanma sonrası CO₂ tutma tesisini inşa etmiştir. Böylece 240 MW kömür santralinden çıkan baca gazından akımından günde 4.800 ton CO₂ yakalayabilecektir.

Çin'de şu anda karbon tutma ve depolama alanında çok sayıda pilot, demo ve ticari proje vardır. Bunların toplam tutma kapasitesi 2 Mton/yıl civarında olup çoğunlukla petrol çıkarma amaçlıdır (EOR). Düşük karbon politikası kapsamında Çin'in 77 şehrinde pilot projeler

gerçekleştirilmektedir. Aktiviteler sadece demo projeler olarak değil, planlama, politika oluşturma, piyasa ve değerlendirme mekanizmaları geliştirme, iş birlikleri olarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda 8 şehir düşük karbon statüsü kazanmış, 51 endüstriyel bölge ve 400 yerel uygulamada düşük karbon projeleri yapmaktadır. Ayrıca, Ulusal Metroloji Kurumu altında karbon ölçüm teknik komitesi oluşturulmuştur [20, 21].

Almanya'da uygulanan projelerde, CO₂'nin yakalanması ve ayrılması, CO₂'nin kimyasal madde üretiminde kullanımı, enerji depolamada kullanımı temel alanlardır. Büyük projelerden birisi olan karbondan kimyasal üretimi projesinde (Carbon2Chem), çelik sektöründen alınan CO₂ ve diğer gazlardan sıvı yakıt, plastik ve gübre üretimi prosesleri geliştirilmektedir. Almanyanın 2030 "İklim Aksiyon Programı" dökümanı; karbon fiyatlandırma, endüstri destekleri, verimlilik artırımları ve alternatif prosesler geliştirilmesi yanında hidrojen kullanımının artırılmasını, karbon kullanım ve depolama eylemlerini önermektedir [22, 23].

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Dünyadaki ticarileşen solvent kazanım sistemleri satan ve işleten bazı kuruluşlar şöyle örneklenebilir: Brofind SpA (İtalya merkezli, Türkiye ofisi mevcut); Ecolink Corporate; RCM Engineering Group; Chemoxy; Kimura Chemical Plants Co (KCPC); Mitsubishi Heavy Industries; Peiyang Chemical Equipment Co.; Mirai Co; Kurimoto Ltd.

Solventlerde önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve dünya genelinde yüksek THS'lere ulaşılmıştır. Ancak aynı durum diğer kimyasalların kazanımı ile atıktan değerli bileşen kazanımı için bu ölçüde gelişmiş değildir. Bunlar için ticarileşen iyi uygulama örneği olabilecek kuruluş selüloz kağıt endüstrisi gibi sınırlı sayıdaki ve özellikle de biyo-materyaller sektöründe rastlanmaktadır (Örn. Alfa-Laval, the Thompson Equipment Company (TECO), Andritz Group gibi).

Türkiye'de bazı yabancı kaynaklı firmaların ofisleri veya temsilcileri yer almaktadır. Ancak tamamiyle yerli üretim sistem veya çözümlerin ticarileşmiş örneklerine rastlanmamıştır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Üniversitelerin Kimya, Kimya Mühendisliği, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümleri ve rafineri ve petrokimya alanlarından özel sanayi kuruluşları ortak çalışmalar yürütebilirler.

1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

Üniversitelerin Kimya, Kimya Mühendisliği, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümleri ve rafineri ve petrokimya alanlarından özel sanayi kuruluşları ortak çalışmalar yürütebilirler.

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Kimya (organik sentez, inorganik sentez, fizikokimya, homojen kataliz, heterojen kataliz, reaksiyon takibinde kullanılan analitik yöntemler (NMR, IR vb.) konularında uzman)

Kimya Mühendisi (reaksiyon mühendisi, reaktör tasarımı, malzeme seçimi, ısı transferi, kütle transferi, ayırma teknolojileri tasarımı konularında uzman).

Çevre Mühendisi (Atık yönetimi ve atık minimizasyonu konusunda uzman)

Boya, plastik, ilaç üreticileri, petro-kimya, Ar-Ge merkezleri, üniversitelerin Kimya, Kimya Mühendisliği ve Çevre Mühendisliği Bölümleri.

1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojenin hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için kimya, fizik, malzeme bilimi, enerji mühendisliği, kimya mühendisliği, makine mühendisliği alanlarından uzmanlar, araştırmacılar, mühendisler ve akademisyenler bir arada çalışmalıdır.

Özel sektörden büyük çaplı sanayi kuruluşları (rafineri ve petrokimya, kimya sektörü gibi), küçük start-up ve teknoloji geliştirme şirketleri, üniversiteler ve araştırma merkezleri iş birliği içinde olmalıdır.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

Karbon yakalama ve dönüştürme teknolojisi sıralı bir proses silsilesinden oluştuğu için özel sektör ve kamu kurumlarının bir arada çalışması yanı sıra farklı disiplinlerin de bir arada çalışması gerekmektedir. Belirtilen sorunların çözümüne yönelik, Fizik, Kimya ve Malzeme Biliminde uzman kişiler bir arada çalışmalıdır. Bu kişiler mevcut teknolojiyi en ileride takip edebilen, son gelişmelerden haberdar ve bunların uygulamasında bir miktar tecrübe sahibi

olmalıdır. Bu sayede en yüksek verimli malzeme geliştirilirken bu malzemelerin proses üzerindeki etkisi de incelenebilir.

Petrol rafinerileri mutlaka bu geliştirmenin içinde olmalıdır. Bununla birlikte, demir ve çelik, gübre sektörleri bir arada çalışmalıdır. Özellikle yüksek emisyon miktarlarına sahip olan firmalardan aracılığıyla destek havuzu oluşturmak, bu teknolojinin ülkemizde geliştirilmesinin önünü açabilir. Bu şekilde oluşturulan havuzdan, tutma ve dönüştürme teknolojisi bu havuzdaki firmalara uygulanabilir hale getirilmelidir.

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Öncelikle bu alanda yapılacak çalışmalar için büyük miktarda kullanılmış solvent atığı bulunan sektörlerin bu çalışmalarda yer alması gereklidir. Bunlarla birlikte Kimyagerlerin, Kimya mühendislerinin, Çevre Mühendislerinin, Metalürji ve Malzeme Mühendislerinin birarada çalışması ile önemli Ar-Ge projeleri üretilebilecektir. Bu disiplinlerden araştırmacıların yer aldığı Üniversiteler, Enstitüler ve Sektörel Ar-Ge merkezleri ortak çalışma yürütebilirler. Bunlara ilaveten geri kazanılmış kimyasalların katma değerini ve marjnal faydasını arttıracak çalışmaların yapılması için pazar araştırması ve sektör-pazar eşleşmesi üzerine optimizasyon çalışmaları yapabilecek optimizasyon uzmanları da çalışmalara katılabilirler.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için üniversitelerin Kimya ve Kimya Mühendisliği Bölümleri, araştırma enstitüleri, teknopark şirketleri, atıkların toplanması ve ayrılması ile ilgili küçük, orta büyük ölçekli sanayi kuruluşları ve belediyeler, teknoloji geliştiren ve üreten mühendislik firmaları, üretilen ürünleri işleyecek olan petrokimya tesisleri ve rafinerilerin işbirliği platform destekleri, büyük ölçekli proje destekleri ile birlikte çalışması gerekmektedir.

1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

Belirtilen kuruluşlar hizmet alımı ve danışmanlık olarak bir araya gelerek çalışmalı. COTC projeleri büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri olarak tanımlanmalıdır.

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Öncelikle ayrı-ayrı küçük Ar-Ge projeleri devamında ise iyi en etkin sonuçların alındığı spesifik yenilik projeleri üzerinden eşgüdüm içinde platform projeleri ile Ar-Ge çalışması yapılmalıdır.

1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

Büyük sanayi kuruluşları, Ar-Ge merkezleri ve akademik ortaklar, hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu amacıyla küçük/orta/büyük ölçekli Ar-Ge ve yenilik projeleri, teknoloji platformları, yenilik ağları vb gibi her türlü ortamda uygun kapsamlar altında bir araya getirilebilir. Destek mekanizmaları için benzer AB Horizon Europe çağrıları örnek alınabilir.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için üniversitelerin Kimya ve Kimya Mühendisliği Bölümleri, araştırma enstitüleri, teknopark şirketleri, küçük, orta büyük ölçekli sanayi kuruluşları ve belediyeler, teknoloji geliştiren ve üreten mühendislik firmaları, üretilen ürünleri işleyecek olan petrokimya tesisleri ve rafinerilerin birlikte çalışması gerekmektedir. Bu doğrultuda küçük ve orta ölçekli proje destekleri ve işbirliği platform destekleri sunulmalıdır.

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Bu alanda kullanılmış kimyasalların geri kazanımı üzerine yapılabilecek yenilikçi çalışmalarda güdüleyici unsurun atık üreticisi olması daha yaygın etkili ve daha yüksek katma değerli projeler çıkarılmasına katkı sağlayacaktır. Atık üreticisinin atık temini ile Üniversiteler, Enstitüler ve Ar-Ge merkezlerinde disiplinlerarası yürütülecek küçük ölçekli çalışmalarla geri kazanım alternatiflerinin üzerinde yenilikçi çalışmalar yapılması önemli bir başlangıç olacaktır.

Atık üreticisinin yüksek miktardaki kullanılmış kimyasal atığı üzerinde önceki bölümde belirtilen disiplinlerden katılacak araştırmacıların ortak çalışması ile küçük ve orta ölçekli Ar-Ge

çalışmalarının yapılmasının ardından geliştirilecek yöntemlere ait teknolojilerin çalışılması ve gerçek ölçekte kurulabilmesi için teknoloji platformları yararlı olabilecektir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.1.a. Organik bazlı atık materyallerden temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol, vb.) üretimi ve enerji kazanımı için termokimyasal ve katalitik dönüşüm süreç uygulamaları

Temel Ar-Ge çalışmalarından başlayacak olan bu alandaki araştırmalar için kısa vadeli (1-3 yıl) proje süreleri ile ilk çalışmalar tamamlanabilecektir. En az 200 Milyon TL gibi bir araştırma bütçesi ile yapılabilecek olan kısa vadeli projelerin daha sonra orta vadede pilot ölçek ve gerçek ölçek çalışmaları yapılabilir. Bu orta vadeli çalışmalar için daha yüksek Ar-Ge ve pilot uygulama bütçeleri yararlı olacaktır.

1.1.b. Ham petrolden direkt temel petrokimyasal ara girdilerin (temel olefinler, BTX aromatikler, metanol vb.) tek aşama üretimi ile karbon ayak izinin azaltılması

COTC projeleri katalizör ve proses geliştirme projeleri olduğundan ve karbon ayak izini düşürme gibi bir misyon için izleme çalışmasını da kapsamı gerektiğinden uzun vade (>5 yıl) projeleri olarak tanımlanabilir.

1.1.c. Kimyasalların üretim proseslerinde atık minimizasyonunu sağlayacak teknolojilerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Proof-Of-Concept, 3 yıl olmalıdır. En fazla Orta Vadede bu çalışmalar tamamlanmalıdır.

1.1.d. Hammadde olarak yeşil, mavi hidrojen üretim proseslerinin enerji yoğun kimyasal üretim proseslerine entegrasyonu

Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi için orta vade (1-5 yıl) yeterli olacaktır.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı toplam 25 Milyon TL ve Demonstrasyon-Pilot üretim için 30 Milyon TL ve tek Yatırım için 50 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

1.1.e. Kimyasal proseslerde karbon (karbondioksit karbonmonoksit) tutma/yakalama ve dönüştürme teknolojilerinin uygulanması

Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi için orta vade (1-5 yıl) yeterli olacaktır.

Ayrılması gereken tahmini bütçe hedeflenecek teknolojiye göre 20-100 Milyon TL arasında değişmektedir.

1.1.f. Kullanılmış solventlerin ve diğer kimyasalların geri kazanımı ve girdi olarak kullanımına yönelik yenilikçi çözümler

Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularına yönelik çalışmaların gerçekleştirilmesi için orta vade (1-5 yıl) yeterli olacaktır. Sektörle ortak yapılan projeler 1-3 yıl, temel Ar-Ge projeleri 1-2 yıl içerisinde eş zamanlı yapılabilecek farklı sektör ve nitelikte projeler olarak tamamlanabilir. Pilot ölçekli çalışmalara temel projeleri müteakip 1-3 yıl ayrılması gereklidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe sektöre ve atığın niteliklerine ve türüne bağlı olarak geliştirilecek teknolojiye göre 100-300 Milyon TL arasında değişmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamunun atması hususlar	adım gereken	Teknolojik ilerlemenin sağlanması için öncelikle ihtiyaç duyulan altyapının tespiti, temini ve Ar-Ge için fon sağlanması en önemli husustur. Kimyasal, makine ve teçhizat temini oldukça uzun süreler almakta maliyetleri ise gümrük vergisi, ara komisyonlar nedeni ile yurt dışına göre oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle Ar-Ge amacı ile kullanılacak sarf malzemesi ve makine teçhizat için doğrudan alım ve vergi muafiyetleri Türkiye'deki Ar-Ge çalışmalarını rekabet gücünü artıracak önemli hususlar olarak öne çıkmaktadır.
Mevzuat ve düzenlemeler	yasal	<ul style="list-style-type: none">• Standartların erişime açık hale getirilmesi,• Fikri mülkiyet hakları konusunda yapılabilecek düzenlemeler,• Patent desteklerinin artırılması,• Patent başvuru ve kabul aşamalarındaki prosedürlerin kısaltılması• Teknoloji transfer yönetmeliklerinin incelenmesi ve süreçlerde hız kazanılması
Teknik Altyapılar		Biyo esaslı polimer sentezine yönelik altyapıların geliştirilmesi gerekmektedir. Elde edilen biyopolimerin laboratuvar ölçekte membran üretiminde kullanımına yönelik membran üretim alt yapıları, karakterizasyonu üniversiteler ve Ar- Ge merkezlerinde bulunmaktadır.

	<p>Ticarileşme yolunda sertifikasyon merkezleri oluşturulmalıdır.</p> <p>Ülkemizde bulunan, UME ve TÜRKAK gibi kuruluşlardan sertifikasyon hizmeti alınabilmektedir. İhtiyaç halinde uluslararası geçerliliği olan sertifikasyonlar temin edilmelidir.</p> <p>Üretim ve test altyapıları seramik membran geliştirmek için yetersizdir. Dünyadaki seramik membran geliştirilmesine ve üretilmesine yönelik uzmanlaşmış araştırma merkezleri dikkate alınarak tespit edilecek ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak kapsamlı bir altyapı yatırımı yapılması gereklidir.</p>
<p>İnsan Kaynakları (İlgili yetkinlikte kalifiye eleman, ara teknik eleman, vb.)</p>	<p>Ülkemizdeki üniversite altyapıları ve lisans seviyesindeki bölümlerde, Araştırma Merkezlerinde ve sanayide konu ile ilgili insan kaynağı açısından bir kısıt bulunmamaktadır. Bunların yanında, uzmanlık kazanılması ve yetkinliklerinin artırılması amacıyla ilgili konularda çağrılara çıkılabilir, motivasyon amaçlı başarı bursları sağlanabilir ve/ veya sanayi iş birlikleri ile çalışma hayatına kazandırılarak istihdam sağlanabilir. Bu gibi önemli çalışmalar ile alandaki yetkin insan kaynağı sayısı artırılabilir ve ticari ürüne geçiş hızlanabilir.</p> <p>Ekonomik ve akademik teşviklerin seramik membran üretimi için doğru kurgulanması durumunda yeterli insan kaynağı mevcuttur.</p>
<p>Teşvik ve Destekler</p>	<p>Hedeflenen ilerlemenin sağlanması için büyük bütçeli altyapı yatırımlarına ve beraberinde Ar-ge desteğine imkan tanıyacak teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır.</p> <p>Çeşitli teşvik programları ile (TEYDEB, hibe, uzun vadeli kredi vs) geliştirilecek ürünlerin ticarileştirilmesine katkı sunulabilir.</p> <p>Girişimcilik konuları desteklenebilir.</p> <p>Öncelikli konularda desteklenen projelerde destek amaçlı vergi indirimleri yapılabilir.</p> <p>Proje çalışanlarındaki proje teşvik ikramiye oranları artırılabilir.</p> <p>Altyapı, bakım onarım ve teçhizat destekleri artırılmalıdır.</p>

Diğer

Yaşam Döngü Değerlendirme Metodolojileri ile kimyasalların bölgesel ve küresel boyutta yol açabileceği çevre kirliliklerine dair çevresel etki analizlerini içeren bir veri tabanı oluşturulması; oluşturulan veri tabanında kimyasalların üretildiği hammaddelerden başlayarak, en iyi teknolojilerin uygulanması ve bu şekilde üretilen kimyasalların tüketici tarafından tercih edilmesi ve kullanımı, kullanım sonrası kimyasalların bertarafı gibi yaşam döngüsü üzerinden kimyasal ürün çevre ayak izi hesaplamalarının önemli olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sandalow, D., Aines, R., McCormick, C., McCoy, S., «Carbon Dioxide Utilization ICEFRoadmap 2.0,» 2017.
- [2] CO2 Sciences and The Global CO2 Initiative, «Global Roadmap for Implementing CO2 Utilization,» Kasım 2016.
- [3] IEA, «Transforming industry through CCUS,» International Energy Agency, 2019.
- [4] IEA, «Energy Technology Perspectives 2020, Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage, CCUS in clean energy transitions,» International Energy Agency, 2020.
- [5] IPCC, «Carbon Dioxide Capture and Storage,» Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report, Cambridge University Press, 2005.
- [6] USDOE, «DOE/NETL Carbon Capture Program—Carbon Dioxide Capture Handbook,» U.S. Department of Energy, 2015.
- [7] IEA, «Putting CO2 to Use: Creating Value from Emissions,» International Energy Agency, 2019.
- [8] International Association of Oil and Gas, «Global CCUS projects,» Nisan 2021.
- [9] Jung, S., Lee, S., Min, J., Lee, M., & Ahn, J. W., «Analysis of the State of the Art of International Policies and Projects on CCU for Climate Change Mitigation with a Focus on the Cases in Korea,» Sustainability, no. 13(1), 19. MDPI AG, <http://dx.doi.org/10.3390/su13010019>, 2020.
- [10] Global CCS, «The Global Status of CCS 2018,» Global CCS Institute, Docklands, Australia, 2018.
- [11] Park, J., Kim, K., «CCUS R&D Projects DB from 2010 to 2017,» Ministry of Science, ICT and Future Planning, Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning, Seoul, Korea, 2018.
- [12] ECCSEL, «How CCUS and ECCSEL ERIC are embedded in national strategies, roadmaps and funding programmes, both at EU country level and within in-country regions,» 2021. [Çevrimiçi]. Available: www.eccsel.org. [Erişildi: 2022].

[13] EC, «Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal COM(2019) 640 final,» European Commission, 2019.

[14] Czernichowski-Lauriol, I., Czop, V., Delprat-Jannaud, F., El Khamlichi, A., Jammes, L., Lafortune, S., Nevicato, D., Savary, D., «The Gradual Integration of CCUS into National and Regional Strategies for Climate Change Mitigation, Energy Transition, Ecological Transition, Research and Innovation: An Overview for France,» Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021, no. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3821672>, February 16, 2021.

[15] UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy, «Policy paper The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution,» 2020. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title>. [Erişildi: 2022].

[16] UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, «The UK carbon capture, usage and storage (CCUS) deployment pathway: an action plan,» 2018. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/the-uk-carbon-capture-usage-and-storage-ccus-deployment-pathway-an-action-plan>. [Erişildi: 2022].

[17] UK, «Energy White Paper: Powering Our Net Zero Future,» Secretary of State for Business, Energy and Industrial Strategy, 2020.

[18] RITE, «RITE Today, Annual Report, Vol.16,» Research Institute of Innovative Technology on Earth, 2021.

[19] METI, «Japan's Roadmap to "Beyond-Zero" Carbon,» Ministry of Economy, Trade and Industry, 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/roadmap/index.html. [Erişildi: 2022].

[20] IEA, «An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China,» International Energy Agency, 2021.

[21] Bofeng Cai, Qi Li, Qianguo Lin, Jinfeng Ma et al., «China Status of CO₂ Capture, Utilization and Storage (CCUS) 2019 [R],» Center for Climate Change and Environmental Policy, Chinese Academy of Environmental Planning, 2020.

[22] BMUV, «Climate Action Plan 2050,» Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, 2016.

[23] FONA, «Funding Measures,» Research for Sustainable Development, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.fona.de/en/measures/funding-measures/carbon2chem-project.php>. [Erişildi: 2022].

Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

1.2. Temel petrokimyasalların ve ileri malzemelerin sürdürülebilir üretimi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

1.2.a. Atık plastiklerin monomere dönüşürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 1.2.

1.2. Temel petrokimyasalların ve ileri malzemelerin sürdürülebilir üretimi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Endüstriyel aktivitelerden yüksek miktarlarda ve farklı yapılarda üretilen katı atıkların doğrudan depo sahalarına gönderilmeyip geri dönüştürülen oranının artırılması yönünde çabalar artmaktadır. Arıtma çamurları dahil tüm katı atık materyalin sisteme geri dönüşümünü sağlayan, üstelik bu dönüşümün daha az yeni kaynak ve enerji tüketen, düşük karbon izine sahip, ekonomik ve uygulanabilir alternatiflerini sunan yaklaşımlar bulunması gereklidir.

Her yıl dünya genelinde üç yüz seksen milyon ton (380 Mt) plastik üretilmektedir, bu da üretilen ham petrol ve doğal gazın yaklaşık %7'sine karşılık gelmektedir. Plastik pazarı günümüzde hızla genişlemekte ve tahminlere göre plastik üretiminin 2050 yılına kadar dört katına çıkacağı tahmin edilmektedir (yılıda 1100 ila 1500 Mt). Üretimin artması ve plastik kullanım alanlarının çeşitlenmesi büyük miktarda atık oluşumuna ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Günümüzde, oluşan bu atıkların büyük bir kısmı atık depolama sahalarında ve çevrede kontrolsüzce birikmekte veya enerji santrallerinde elektrik üretimi amacıyla verimsiz bir şekilde yakılmaktadır. Bu süreç sonucunda sera gazları (örneğin CO₂) ve toksik yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Atık plastiklerin %9'u mekanik yöntemle geri dönüştürülmektedir. Fakat mevcut geri dönüşüm yöntemleri, plastiklerin kimyasal ve enerji değerlerinin geri kazanımını sağlayamamakta ve değer kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle mevcut geri dönüşüm yöntemlerinin yanında plastik atıklarını değerli ürünlere dönüştürecek yeni prosesler ve teknolojiler geliştirilmelidir.

Atık plastiklerden elde edilen monomerler, yakıtlar, piroliz yağları, rafineri ve petrokimya endüstrisinde girdi olarak kullanılabilir sıvı ürünler, vakslar ve aromatikler kritik ürünlerdir. Bu ürünlerin üretilmesinde kullanılan teknolojiler ise katalitik ve katalitik olmayan piroliz, hidrokraking, alkan metatezi, depolimerizasyon ve biyoprosesleri de kapsayan diğer yöntemlerdir.

Yakma ve düzenli depolama seçenekleri listeden çıkarıldığında geriye kalan mekanik, kimyasal ve/veya termal geri dönüşüm süreçleri ile yeni geliştirilecek yöntemlerin birbiriyle rekabet edebilecek nitelikte hem çevre dostu, hem ekonomik değeri olan ürünler üretmesi beklenmektedir. Mevcut geri dönüşüm yöntemleri, plastiklerin kimyasal ve enerji değerlerinin

geri kazanımını sağlayamamakta ve değer kaybına yol açmaktadır. Bu nedenle mevcut geri dönüşüm yöntemlerinin yanında plastik atıklarının değerli ürünlere dönüştürecek yeni prosesler ve teknolojiler geliştirilmelidir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Atık plastiklerden elde edilen monomerler, yakıtlar, piroliz yağları, rafineri ve petrokimya endüstrisinde girdi olarak kullanılabilir sıvı ürünler, vakslar ve aromatikler kritik ürünlerdir.

Mevcut geri dönüşüm yöntemleri, plastiklerin kimyasal ve enerji değerlerinin geri kazanımını sağlayamamakta ve değer kaybına yol açmaktadır. Atık polimerlerin enerji değerinin geri kazanıldığı takdirde, her yıl yaklaşık 3,5 milyar varil petrole eş değer ekonomik bir karşılığının olacağı tahmin edilmektedir

Kimyasal geri dönüşüm (Tersiyer Geri Dönüşüm), mekanik işlemlerle sürdürülebilir bir şekilde geri dönüştürülemeyen plastik atıkların daha basit ve değerli moleküllere geri dönüştürülmesi amacıyla geliştirilmiş bir teknolojidir. Bu atıklara örnek olarak, çok katmanlı ambalajlar ve kompozit plastikler, düşük kaliteli karışık plastik atıkları ve kontamine plastikler gösterilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm prosesi sonucunda elde edilen çıktılar, birincil polimerlerin üretiminde hammadde alternatifi olarak veya yeni kompozitlerin üretiminde girdi olarak kullanılabilir. Atık plastikler, katma değere sahip kimyasalların ve malzemelerin üretimi için geniş ve henüz kullanılmamış muazzam bir hammadde olarak düşünülebilir.

Termokimyasal yöntemlerle plastik atıkların sıvı ürünlere dönüştürülmesi başka bir kazanım yaklaşımıdır. Katalitik termokimyasal uygulamalarda birçok doğal malzeme ve atık malzeme katalizör olarak başarı ile kullanılma potansiyeline sahiptir.

Plastiklerin termokimyasal bozunması ile üretilen sıvı ürünler bir matriks yapıda olup temel olarak bulunan organik bileşen grupları alkan, alken, alkin, asit, fenol, benzen, terpen, aldehit, ester, alkol, keton ve diğerleri olarak sayılabilir. Plastik türüne, işlem koşullarına ve katalizör varlığına bağlı olarak grupların çeşitliliği, sayıları ve izomerleri farklılık gösterir. Örneğin 300°C ve üzerindeki sıcaklıklarda aromatik yapıları plastiklerin ısıl bozunması sonucunda methylparaethyl benzoate, methylparatoluat, dimethyldiphenyl-4.4-carboxylate gibi uçucu olmayan bazı bileşikler görülürken, termokimyasal işlem sıcaklığı arttıkça vinyl benzoate, terephthalic acid, linear dimers, ketene, 1,4-dioxane, toluene, benzaldehyde, divinyl terephthalate, benzoic acid, 2-3 monomer yapıları oligomerler gibi fonksiyonel ürünler oluşmaktadır. Geri kazanım potansiyeli olan ürünler ester, eter, karbonil, vinil, karboksil, aldehit

gibi fonksiyonel gruplarla, metil grubu, aromatik halka, veya heterosiklik halka içermektedirler. Benzer şekilde alifatik yapıları plastiklerden kazanılabilecek bileşikler şöyle örneklenebilir: Cyclohexane, 9-Cyclohexylnonadecane, 2-Undecene, 1,3-Heptadiene, 6,6-Dimethylhepta-2,4-diene, Isotridecanol, 1-Heptanol, 2,4-diethyl, 1-Decanol, 2-hexyl vb. Plastiklerden kazanılan bileşenlerin birçoğu endüstriyel üretimde hammadde veya ara ürün girdisi olarak yer bulmaktadır. Bunların mevcutta teminleri sentetik kimyasallar üretimi ile sağlanmaktadır.

Fonksiyonel bileşik geri kazanımı için en etkili termal prosesler arasında piroliz ve katalitik piroliz sayılabilmektedir. Literatürde plastiklerde kazanımı sağlanan bileşenlerin katalizörün asit siteleriyle ilişkili olduğu ve örneğin fenolik bileşiklerin asidik katalizörlerle daha verimli olduğu belirtilmiştir. Piroliz sıvılarından hangi kimyasal gruplarının kazanımı hedefleniyorsa ona uygun işletme koşullarının sağlanması gereklidir. Bu işletme koşulları arasında sıcaklık ve basınç başta gelmekle birlikte bekleme süresi de önem taşımaktadır. Çünkü belli bir sıcaklıkta daha uzun bekleme süresi termokimyasal reaksiyonun ürünlerini etkilemektedir. Diğer taraftan gereğinden uzun bekleme sürelerinin de enerji tüketimi açısından sakıncası açıktır. Bu sebeple uygun katalizör geliştirilmesi ve sistem konfigürasyonu ve özellikle bütün bunların sürekli reaktörlü sistemde sağlanabilmesi önemli çalışma alanıdır.

Genellikle kimyasal ve termokimyasal proseslerde elde edilen ürünün saf olmaması, karışım olması sebebiyle ayırma-safılaştırma işlemi de geliştirilmeli ve uygulamaya aktarılabilir şekilde sistem tasarımı yapılmalıdır. Bu alanda literatürde birçok çalışma bulunmakta ve çoğunluğu da laboratuvar ölçeğinde kalmaktadır. Bunun sebeplerinden birisi de plastiklerden ayrıştırılıp kazanılabilecek karbon malzemelerin yeterince tanımlanmamış olması ve diğer taraftan da hali hazırda uygulanan yakarak enerji eldesi gibi yöntemlerin daha kolay görülen ve daha hızlı sonuç alınan seçenekler olmasıdır. Karbon ayak izi açısından bakıldığında aslında piroliz yağlarından hammadde kazanımı hem sıfır hammaddenin tüketimini azaltacak, hem bu hammaddelerin üretilmesi sırasında harcanan enerji ve karbon ayak izini azaltacak, hem de atık materyalin bertarafı için harcanacak enerjiyi ve karbon ayak izini de düşürerek daha yüksek faktörlü kazanım ile yeşil kimyasal üretim sağlayacaktır.

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET monomerlerinin geri kazanılması

Oligomerler PET plastiklerin yapısında bulunan önemli bileşenlerdir. Bir çok plastik türünde olduğu gibi PET yapısında da oligomerler polimere özgü yapıda, ortak bileşen maddeler olarak düşünülebilir. Oligomerler aynı zamanda başka birçok endüstriyel prosesin önemli girdileridir. Bu sebeple endüstriyel üretimde yaygın kullanılırlar ve önemli maliyet unsurları arasındadırlar. Oligomerlerin atık plastiklerden geri kazanımı plastiğin yapısındaki boyalar vb diğer katkı malzemelerinin varlığından ve proses operasyonel parametrelerinden önemli oranda

etkilenecektir. Bu tür geri kazanım uygulamalarının örnekleri mevcut olmakla birlikte uygulamaya aktarılması aşamasında teknoloji geliştirilmelidir. Genellikle bu geri kazanım işlemi için uygulanan prosesler optimize edilmelidir. Elde edilen ürünün saf olmaması sebebiyle ayırma-safılaştırma işlemi de geliştirilmeli ve uygulamaya aktarılabilecek şekilde sistem tasarımı yapılmalıdır. Bunlara ilaveten, termokimyasal proseslerde katalizör kullanımının da oligomer kazanımı üzerine etkili olduğu, fakat doğru katalizörün seçilmesinin önemli olduğu da bilinmektedir. Buna göre başka atık materyaller de dahil olmak üzere farklı katalizör geliştirilmesi ve sürdürülebilir, verimli, yüksek kapasiteli üretim sistemlerinin oluşturulması bu alandaki ihtiyaçlar arasında yer almaktadır.

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

Plastiklerin termokimyasal bozunması ile üretilen katı ürünler piroliz koku (çar) ve karbon siyahıdır. Bazı proseslerde karbon siyahı doğrudan elde edilebilirken bazı proseslerde karbon çar veya ham karbon siyahı (raw recovered carbon char) olarak toplandıktan sonra rafinasyon ile karbon siyahısına dönüştürülebilmektedir.

Poliesterler, sıcaklık, ısıtma süresi, katalizörlerin ve oksitleyici ajanların varlığı nedeniyle ısıtma sırasında bozunmaya başlar. Bazı plastikler bozunma başlangıcında zincir uç parçalanmasına uğrar ve molekül içi ısıl bozunma ve zincir ucu ısıl bozunma mekanizmaları ile önce küçük moleküllü uçucu bileşikler oluşur sonra karboksil ve vinil ester gibi gruplarla sonlanan daha küçük zincirler oluşur. Piroliz reaksiyonlarında plastik yapısındaki alifatik gruplar uçucu bileşiklere parçalanır, kalıntı ürün aromatik halkalar içerir. Bozunma ürünleri plastik yapısına bağlı olmakla birlikte karbondioksit, asetaldehit, lineer dimerler, 2-3 monomer birimi içeren halka yapılı oligomerler sayılabilir. Parçalanma ürünleri arasında akışkan faza etilen, metan, karbon monoksit 1,4-dioksan, toluen, benzaldehit gibi bileşenler geçerken aromatik karbon yapıda çar oluşur. Genel olarak, aromatik yapı, çar oluşturan grup olarak kategorize edilir ve aromatik yapı içeriği ne kadar fazlaysa, daha kompakt veya daha büyük miktarda çar elde edilir. Alifatik yapılı plastiklerde büyük polimer molekülleri önce serbest radikallere ayrılır, bunlar çoğalma reaksiyonları sırasında daha küçük radikallere veya moleküllere bölünebilir. Başlama reaksiyonlarından üretilen büyük serbest radikaller parçalanarak alken molekülleri ve daha küçük serbest radikaller oluşur. Sonlanma reaksiyonlarında rekombinasyon sonucu alifatik hidrokarbonlarla çar oluşur.

Genellikle düz zincirli veya dallanmış yapıdaki polimerik malzemelerde termokimyasal parçalanma ile akışkan faz bileşenleri daha kolay ve daha fazla miktarda olduğu için çar ürün miktarı daha azdır. Atık polimer kompozitlerde polimer yapısı, piroliz koşulları ve katalizör varlığı ve türü çar ürün yapısını doğrudan etkileyen faktörlerdir.

Piroliz çarlarının adsorban madde olarak etkinliği literatürde birçok çalışma ile incelenmiş olsa da laboratuvar ölçeğinden daha ileriye geçmemiştir. Diğer taraftan kimyasal veya termal aktivasyon uygulanarak piroliz çarı aktif karbona dönüştürülmekte ve çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Daha çok biyokütle atıklar için yaygın olduğu bilinen bu uygulamanın plastik atıkların piroliz çarları için de verimli örneklerine rastlanılmaktadır.

Piroliz çarları, özellikle de biyokütle harici atıklar, örneğin plastiklerden elde edilen çarlar piroliz edilen atığın yapısındaki mineralleri ve diğer inorganikleri de barındırmaktadır. Karbon siyahı eldesinde bunların ayrıştırılması söz konusudur. Bu sebeple en verimli karbon siyahı saf organik karbon yapılardan, örneğin petrol türevlerinden elde edilmektedir. Genellikle çar kimyasal ile işleme tabi tutularak karbon siyahı (recovered carbon black) kazanımı sağlanır.

Karbon siyahı başta kauçuk ve lastik endüstrisi olmak üzere birçok endüstriyel üretimde güçlendirici katkı malzemesi olarak değerli bir üründür. Ayrıca karbon siyahının elektriksel iletkenliği sağlaması da bu malzemenin endüstriyel üretimde kullanım alanını genişletmekte ve değerini arttırmaktadır. Yıllık karbon siyahı tüketiminin 11-13 Milyon ton, toplam pazar büyüklüğünün yıllık 16 milyon Avro civarında olduğu ve sıfır karbon siyahının yerine sektörde %10 ila %100 arasında piroliz ile geri kazanılmış karbon siyahının kullanılabilirdiği de dikkate alındığında karbon siyahı ve rafine karbon siyahı üretim yöntemlerinin geliştirilmesi önemli Ar-Ge alanları arasında sayılmaktadır. Bunların büyük miktarda ve sürdürülebilir üretimini sağlayan teknolojilerin geliştirilmesi ve ölçeklendirilmesi de üzerinde çalışılması önem taşıyan konular arasındadır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünyada üniversiteler, araştırma merkezleri, küçük ve büyük ölçekli projeler ile atık plastiklerden değerli ürünler üretilmesi üzerine çalışmaktadırlar. Bu projeler kapsamında daha yeşil, daha düşük enerji ihtiyacına sahip, daha karışık atık girdisini işleyebilecek ve geliştirilen proseslere özel katalizörlerin tasarlanması ve üretimi amaçlanmaktadır.

Dünyada atık plastiklerden monomer, yakıt ve piroliz yağı üreten şirketlere örnekler aşağıda verilmiştir.

Agilyx Corporation (ABD), ARCUS Greencycling GmbH (Almanya), BioBTX B.V. (Holanda), BlueAlp BV (Holanda), BP (Birleşik Krallık), Brightmark Energy LLC.(ABD), Carbios(Fransa), Cassandra Oil (İsveç), Chevron Philips Chemical (USA), Clariter (Lüksemburg), DEMONT (İtalya), DuPont Teijin Films (ABD), EASTMEN (Holanda), Fuenix Ecology (Hollanda) , Future Energy Investments (Avustralya), Gr3n Sagl (İsviçre), GreenMantra Recycling Technologies Ltd. (Kanada) Handerek Technologies (Polonya), Ioniqa Technologies B.V. (Hollanda), JBI, (ABD), Klean Industries Inc. (Britanya Kolombiyası), Licella Holdings Ltd. (Avustralya), Llyondellbasel Industries (Hollanda), Loop Industry (Kanada), Neste (Finlandiya), New Hope Energy (ABD), Nexus Fuels LLC (ABD), OMV (Avusturya), Plastic Energy (İspanya), Quantafuel (Norveç), Recenso (Almanya), Recycling Technologies (Birleşik Krallık), SABIC, (Suudi Arabistan), Synova (Hollanda).

Bu firmalar pilot ölçekten ticari ölçeğe kadar üretim tesislerine ve ticari ürünlere sahiplerdir. THS değerleri 6-9 (Prototip Geliştirme, Ürünleşme ve Ticarileşme) olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye’de ise bilindiği kadarı ile yapılan çalışmalar ve kurulan sistemler değerlendirildiğinde THS değeri 1-5 (Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları) seviyesinde olarak değerlendirilmektedir.

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET oligomerlerinin geri kazanılması

Çeşitli kimyasal, glikolitik ve termokimyasal proseslerle oligomer eldesi için Türkiye’de THS: 3-7, dünyada THS: 6-9’dur.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

Piroliz ve katalitik piroliz çarı eldesi için dünyada THS:6-9 ve Türkiye’de THS: 6-9

Piroliz ve katalitik pirolizde karbon siyahı eldesi için dünyada THS:6-9 ve Türkiye’de THS: 6-9

Çardan rafinasyon ile karbon siyahı eldesi için dünyada THS:6-9 ve Türkiye’de THS: 6-9’dur.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Aşağıda dünyada ticarileşme aşamasına gelmiş proseslere bazı örnekler verilmiştir.

- Plastic Energy

Plastic Energy İngiltere merkezli bir teknoloji geliştirme şirkettir. Almeria ve Sevilla’da (İspanya) sırasıyla 2016 ve 2017’den beri faaliyette olan iki kimyasal geri dönüşüm tesisine sahiptir. Patentli piroliz (Thermal Anearobic Conversion-TAC) prosesi, geri dönüştürülmüş plastikler oluşturmak için ömrünü tamamlamış plastik atıkları yeni bir hammaddeye dönüştürmek üzere tasarlanmıştır. İşlenen her bir ton ömrünü tamamlamış plastik atık için 850 litre kimyasal hammadde TACOIL (piroliz yağı) üretilmektedir. Şirketin SABIC, Totalenergies, Exxonmobil, Ineos ve Nestle firmaları ile 15,000 t/a - 33,000 t/a arasında kapasiteleri değişen fabrikalar kurulması üzerine ortaklıkları bulunmaktadır.

- Licella

Licella'nın Cat-HTR™ prosesi, yeni nesil gelişmiş geri dönüşüm teknolojisi olan hidrotermal sıvılaştırmayı (HTL) kullanmaktadır. Cat-HTR™, çok çeşitli biyokütle ve plastik atıkları yüksek kaliteli, sürdürülebilir bir yağa ekonomik ve verimli bir şekilde dönüştürmek için yüksek basınç ve sıcaklık altında su kullanmaktadır.

Mura Technology şirketi bu yöntemin lisansının sahibidir ve Kuzey Doğu İngiltere'deki Teesside'da ilk Cat-HTR™ tesisi ile yılda 80.000 ton plastik atığı işlemeyi hedeflemektedirler.

- Synova

Synova'nın MILENA-OLGA yaklaşımı, sentez gazı aşağı akış uygulamalarında kullanılmadan önce kirleticileri ortadan kaldırarak, kimyasalların ve yakıtların üretimi için uygun, doğal gazı alternatif olarak veya kombine çevrim gaz türbinlerinde veya motorlarda kullanılabilen ürünlerin üretilmesinde kullanılmaktadır. MILENA prosesi, sirkülasyonlu akışkan yatak, piroliz ve kabarcıklı akışkan yataklı yakmayı tek bir kaptaki birleştirilen dolaylı bir gazlaştırma konseptidir. OLGA, MILENA'nın tamamlayıcısı olarak geliştirilmiştir. MILENA prosesinin dezavantajı, gaz üründe yüksek katran (tar) içeriğine yol açmasıdır. OLGA prosesinde, gazdan ayrılan katranın MILENA prosesine geri beslenmesi ile ayrıştırılmasını sağlamaktadır. Son ürün; olefinler, BTX ve yenilenebilir yakıtlar dahil olmak üzere çok sayıda uygulamaya sahip yüksek değerli moleküllerden oluşan bir gaz karışımıdır. Synova'nın yatırımcıları arasında Caterpillar Ventures ve FullCycle Fund yer almaktadır.

Türkiye'de SOCAR Ar-Ge ve İnovasyon A.Ş ile ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nün birlikte yürüttüğü bir proje bulunmaktadır. Bu proje kapsamında atık plastiklerin %90'ını oluşturan poliolefin tipi polimerleri daha değerli ürünlere dönüştürecek yenilikçi teknolojiyi geliştirmesi amaçlanmaktadır. Spesifik olarak, atık poliolefinlerden rafineri ve petrokimya girdisine uygun likit hammadde eldesini mevcut yöntemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek seçimlilikte gerçekleştirecek katalizör ve süreç geliştirilecektir. Bu proje tamamlandığında THS seviyesi 4 olan bir çalışma yapılmış olacaktır.

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET oligomerlerinin geri kazanılması

Honeywell UOP LLC (Patent sahipleri: Laurence O. Stine, Brian S. Muldoon, Steven C. Gimre, Robert R. Frame); Gevo Inc.; Bomar; Ineos Group; Oligomer Biyoteknoloji-Türkiye.

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

Weibold Tyre Recycling, Waverly Carbon, Orion Engineered Carbons, Continental Carbon International CSRC Investment Holdings Co. Ltd., TT Group Ltd., HTM Türkiye, Gan Piroлиз, Viollas Piroлиз

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET oligomerlerinin geri kazanılması

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

1.2.a – 1.2.c maddeleri;

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için üniversitelerin Kimya ve Kimya Mühendisliği Bölümleri, araştırma enstitüleri, teknopark şirketleri, plastik atıkların toplanması, ayrılması ve işlenecek boyuta getirilmesi ile ilgili küçük, orta büyük ölçekli sanayi kuruluşları ve belediyeler, teknoloji geliştiren ve üreten mühendislik firmaları, üretilen ürünleri işleyecek olan petrokimya tesisleri ve rafineriler, farklı sektörlerden üreticilerin son kullanıcı olarak birlikte çalışması gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET oligomerlerinin geri kazanılması

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

1.2.a – 1.2.c maddeleri;

Üniversiteler, teknoloji geliştiren şirketler ve bu ürünleri girdi olarak kullanan petrokimya tesisleri ve rafineriler Ar-Ge işbirlikleri ile işlenmemiş polimerler, kendi oluşturdukları kompozisyonları belli plastik karışımları ile deneysel çalışmalar yürüterek dünyada geliştirilmiş olan teknolojilerden daha yeşil ve daha yüksek seçimliliğe sahip prosesler ve katalizörler geliştirmelidir. Bu aşamadan sonra pilot ölçekli sistemlerin mühendislik firmalarının desteği ile kurularak ölçek büyütme çalışmaları yapılmalıdır.

Atık plastiklerin kimyasal yöntemlerle geri dönüştürülmesinde demonstrasyon yapılan pilot ölçekli sistemlerde gerçek durumun simüle edilebilmesi adına en önemli parametre temiz ve sürekli aynı kompozisyonda atık karışımının girdi olarak sağlanmasının başarılmasıdır. Bu

amaçla plastik atıkların toplanması, ayrılması ve işlenecek boyuta getirilmesi ile ilgili küçük, orta büyük ölçekli sanayi kuruluşları ve belediyelerin desteği önemlidir.

Pilot ölçek tamamlandığında ticarileşme aşamasında ise geliştirilen prosesin kurulumunda mühendislik firmaları ve işletilmesi, ürüne dönüştürülmesi aşamalarında ise petrokimya tesisleri ve rafineriler görev almalıdır.

Küçük/Orta ve büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri ve işbirliği platform destekleri ile Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

1.2.a. Atık plastiklerin monomerlere ve sıvı ürünlere dönüştürülmesinde yeni proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

1.2.b. Atık kompozit plastiklerden PET oligomerlerinin geri kazanılması

1.2.c. Plastik kompozit materyallerden fonksiyonel karbon malzemelerin üretilmesi

1.2.a – 1.2.c maddeleri;

Laboratuvar ölçekli çalışmalar için en az 3 yıl süre ve ortalama 100-300 Milyon TL bütçe tahmin edilmektedir. Bu kapsamda yeni proses ve katalizör geliştirme çalışmaları tamamlanabilir. Demonstrasyon çalışmalarının yapılacağı pilot ölçekli sistem kurulması ve denemelerin yapılması da orta vadeli çalışmalar olarak değerlendirilebilir ve 3-5 yıl arası sürede 200-400 milyon TL bütçe ile yapılabilir. Ticarileşme ve üretim aşamaları ise uzun vadeli çalışmalar olarak değerlendirilerek, THS değerinin 9 seviyesine gelmesi için 7-10 yıllık bir süre öngörülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Avrupa Birliği; 2015 yılında “Döngüsel Ekonomi Eylem Planı”nı kabul etmiştir. Bu eylem planı ile: AB çapında kentsel atıkların geri dönüşüm oranını 2030 yılına kadar %65'e çıkarmak; AB çapında ambalaj atıklarının geri dönüşüm oranını 2030 yılına kadar %75'e çıkarmak; Farklı malzemelerden yapılan ambalajlar için farklı hedefler koymak; Atık gömme oranını 2030 yılına kadar %10'a indirmek amaçlanmıştır. (İKV Değerlendirme Notu, 'AB ve Türkiye'de Plastiklerin Geleceği', 2020)

Türkiye'de ise 30283 Sayılı Ambalaj Atıkları Kontrolü Yönetmeliği'ne göre, ambalajlar “yeniden kullanılacak, geri dönüştürülecek, geri kazanılacak ve bu işlemleri kapsayan yönetim ve

bertaraf aşamalarında çevreye en az zarar verecek şekilde tasarlanmak ve üretilmek zorundadır". Yönetmelik çerçevesinde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Yönetmelikte yükümlülüğü bulunan tüm taraflarla birlikte gerekli tedbirleri alarak 2020 ve sonrasındaki yıllarda, plastik ambalaj atıklarına yönelik olarak en az %60 geri kazanım ve en az %55 geri dönüşüm hedefine ulaşmayı amaçlamaktadır. (İKV Değerlendirme Notu, 'AB ve Türkiye'de Plastiklerin Geleceği', 2020)

Bu yönetmeliklerin önemi plastik sektöründe olan üretici ve kullanıcılara daha yoğun bir şekilde paylaşılmalıdır. Ayrıca ambalajların daha yeşil ve dögüsel olmasını amaçlayan bu yönetmeliğe uygun polimer üretiminin gerçekleştirilmesi açısından ve mekanik geri dönüşüm ile geri dönüştürölüp ömrünü tamamlayan plastiklerin dahi katma değerli ürünlere dönüştüğü tersiyer geri dönüşüm yöntemlerinin uygulamaya geçmesi gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Katalizör tasarımı ve üretimi üzerine laboratuvar altyapısı olan üniversiteler ve Ar-Ge merkezleri bu konular kapsamında çalışmalar yürütecek teknik alt yapıya sahiptir.

İnsan Kaynakları

Bu konu özelinde yapılacak çalışmalarda insan kaynakları açısından projede görev alacak kişiler (akademisyenler, lisansüstü öğrencileri, AR-GE merkezleri vb.) teknik anlamda yeterlidir. Dögüsel ekonomi ve atıkların kimyasal yöntemlere geri dönüşümü konusunun üniversitelerde lisansüstü çalışma olarak değerlendirilmesi konusunda akademisyenler burslar ve araştırma desteği ile teşvik edilebilir. Belediyeler, küçük/orta/büyük sanayi kuruluşları da benzer desteklerle teşvik edilebilir.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeyi entegre edebilmesi için atık plastiklerin kimyasal yöntemlerle geri dönüşümü konusunu ihtiva eden Avrupa Birliği proje sayısının artması, bu çağrılara başvuran küçük, orta ve büyük ölçekli sanayi kuruluşlarının ek teşviklerle desteklenmesi önemlidir.

Ticarileşmesi uzun vadede gerçekleşecek bu konuya ilişkin projelerde THS seviyeleri ilerledikçe verilen destekler artarak devam etmelidir. Ticarileşme gerçekleştiğinde kurulacak olan yeni işletmelerde istihdamın artacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Teknolojik Hedef 2:

BİYORAFİNERİLER

Petrokimya sektörünün petrol ve doğalgaz girdili proseslerden biyokütle bazlı proseslere geçişini sağlayacak teknolojilerin, altyapının ve uygulamaların geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

2.1. Biyokütle kaynaklarından (tarım, orman, evsel) ve endüstriyel organik atıklardan gazlaştırma, piroliz gibi termokimyasal ve/veya biyokimyasal yöntemlere dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı **termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri** ile **biyoyakıt** ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik **atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm** teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik **seçici heterojen katalizörlerin** geliştirilmesi

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılacak platform kimyasalların üretilmesi

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen, metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 2.1.

2.1. Biyokütle kaynaklarından (tarım, orman, evsel) ve endüstriyel organik atıklardan gazlaştırma, piroliz gibi termokimyasal ve/veya biyokimyasal yöntemlere dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Biyorafinasyon, biyokütleden gıda, yem, kimyasal, malzeme ve biyoenerjinin (güç, ısı/soğuk, yakıtlar) ortak üretimi olarak tanımlanmaktadır. Biyo-kimyasal ve malzeme ürünlerini hedefleyen rafinerilerin, dögüsel ekonominin ve karbon nötr bir ekonomiye geçişini önemli bir parçası olması beklenmektedir. Yerel biyokütle kullanan biyorafineri uygulamaları ile fosil temelli ürünler ve emisyonlar ikame edilerek hammaddede arz güvenliği artmakta ve özellikle kırsal alanlarda iş olanakları artmaktadır.

Biyorafineri operasyonları için önemli olan dört ana değer zinciri kategorisine dayalı olarak kimyasal ve malzeme odaklı biyorafineriler için bir sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir¹:

- Hammaddeye dayalı sınıflandırma
- Dönüşüm proseslerine göre sınıflandırma
- Elde edilen platform kimyasallarına göre sınıflandırma
- Rafineri son ürünlerine göre sınıflandırma

IEA Biyoenerji Görev 42 farklı geliştirme ve uygulama seviyelerinde olan on bir şemsiye biyorafineri yolu tanımlanmıştır (A-K). Aşağıda söz konusu sınıflandırma tabloları verilmektedir¹.

¹ EU Biorefinery Outlook to 2030, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021. ISBN : 978-92-76-32156-9, doi:10.2777/103465

Tablo 2.1. Biyorafineri sınıflandırması¹

1. Feedstocks	2. Conversion Processes	3. Platforms	4. Products
<p>1.1. Primary biomass†:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquatic biomass • Lignocellulosic from croplands and grasslands • Lignocellulosic wood/forestry • Oil crops • Starch crops • Sugar crops • *Other primary biomass <p>1.2. Secondary Biomass†:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Microbial biomass • Residues from agriculture • Residues from aquatic biomass • Residues from forestry and forest-based industry. • Residues from nature and landscape management • Residues from recycled bio-based products • *Other organic residues 	<p>2.1. Biochemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aerobic conversion • Anaerobic digestion • Enzymatic process • Fermentation • Insect-based bioconversion • *Other biochemical conversion <p>2.2. Chemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Catalytic • Esterification • Hydrogenation • Hydrolysis • Methanation • Chemical Pulping • Steam reforming • Water electrolysis • Water gas shift • *Other chemical conversion <p>2.3. Mechanical and thermomechanical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blending • Extraction • Mechanical & thermomechanical disruption & fractionation • Mechanical pulping • Separation processes • Other mechanical and thermomechanical conversion <p>2.4. Thermochemical:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Combustion • Gasification • Hydrothermal liquefaction • Pyrolysis • Supercritical conversion • Torrefaction & Carbonization • *Other thermochemical conversion 	<ul style="list-style-type: none"> • Biochar • Bio-Coal • Bio-Crude • Biogas • Bio-oils • Bio-hydrogen • Bio-Naphtha • C5/C6 sugars • Carbon dioxide • Lignin • Oils • Organic Fibres • Organic Juice • Protein • Pyrolytic Liquid • Starch • Syngas • *Other platform 	<p>4.1. Chemicals:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Additives • Agrochemicals • Building blocks⁶ • Catalysts & Enzymes • Colorants • Cosmeceuticals • Flavours & Fragrances • Lubricants • Nutraceuticals • Paints & Coatings • Pharmaceuticals • Solvents • Surfactants • *Other chemical product <p>4.2. Materials:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Composites • **Fibres • Organic Fertilizers • Polymers • Resins • *Other material product <p>4.3. Food</p> <p>4.4. Animal Feed</p> <p>4.5. Energy:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cooling agents • Fuels • Heat • Power • *Other energy product

* 'Other' is included to enable new concepts, technologies or product categories to be included.

¹ EU Biorefinery Outlook to 2030, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021. ISBN : 978-92-76-32156-9, doi:10.2777/103465

Tablo 2.2 Biyorafineri yoluyla üretilen kimyasallar ve malzemeler⁵

Biorefinery pathway name
A. One platform (C6 sugars) biorefinery using sugar crops
B. One platform (starch) biorefinery using starch crops
C. One platform (oil) biorefinery using oil crops, wastes ^a and residues
D. Two-platform (pulp and spent liquor) biorefinery using wood
E. Three platform (C5 sugars, C6 sugars and lignin) biorefinery using lignocellulosic biomass ^c
F. Two-platform (organic fibres and organic juice) biorefinery using green biomass ^b
G. Two-platform (oil and biogas) biorefinery using aquatic biomass
H. Two-platform (organic fibres and oil) biorefinery using natural fibres ^b
I. One platform (synqas) biorefinery using lignocellulosic biomass ^c and municipal solid waste
J. Two platform (pyrolytic liquid and biochar) biorefinery using lignocellulosic biomass
K. One platform (bio-crude) biorefinery using lignocellulosic, aquatic biomass, organic residues

a. Waste/residue fats, oils and greases belong to category "Other organic residues"

b. Green biomass and Natural fibres belong to category "Lignocellulosic from croplands and grasslands"

c. Lignocellulosic biomass includes Lignocellulosic from croplands, wood/forestry and residues from agriculture and forestry

AB merkezli biyorafinerilerde biyo-kimyasal ve malzeme üretiminin 4,6 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir². Biyoyakıtlar veya biyo-kimyasalların üretiminde girdi olarak kullanılacak biyoetanol, biyometanol, ham yağ, sentez gazı, lignin, C6 şekerleri, nişasta gibi platform kimyasalları farklı fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik dönüşüm prosesleri ile üretilmektedir. Bu çerçevede üretilen platform kimyasallarına göre biyorafinerileri sınıflandırmak mümkündür. Platform kimyasalları, herhangi bir dönüşüm prosesi uygulanmaksızın, tek başına bir alternatif yakıt ya da kimyasal olarak da değerlendirilebilmektedir. Örneğin metanol ve etanol ulaşım yakıtı olarak kullanılmaktadır. Sentez gazı gaz türbinlerinde enerji eldesinde değerlendirilebilmektedir. Kimyasal üretiminde bitkisel yağ & piroliz yağı fraksiyonlarının kullanımına yönelik prosesler de mevcuttur.

Biyorafineriler uygulanan dönüşüm proseslerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir^{5,6}:

- Termokimyasal biyorafineri (gazlaştırma, piroliz vb.)
- Biyokimyasal biyorafineri (fermentasyon, enzimatik reaksiyonlar vb.)
- Kimyasal biyorafineri (katalitik reaksiyonlar, esterifikasyon, hidroliz vb.)

⁵ EU Biorefinery Outlook to 2030, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021. ISBN : 978-92-76-32156-9, doi:10.2777/103465

⁶ Insights into the European market for bio-based chemicals, Factsheets for 10 biobased product categories, 2019. doi:10.2760/75278).

- Mekanik ve termomekanik biyorafineri (filtrasyon, ekstraksiyon, distilasyon vb.)

Biyorafineriler hammaddeye göre de sınıflandırılabilir. Örneğin; şekerli bitkilere dayalı, ekstrakte edilebilir yeşil bitkilere dayalı, algelere dayalı, lignoselülozik hammaddelere dayalı biyorafineriler.

Son olarak nihai ürün odaklı olarak da enerji üretimi odaklı veya malzeme üretimi odaklı biyorafineriler olarak da bir sınıflandırma yapmak mümkündür.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı **termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri** ile **biyoyakıt** ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik **atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm** teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik **seçici heterojen katalizörlerin** geliştirilmesi

Termokimyasal Dönüşüm Prosesleri

Termokimyasal dönüşüm proseslerinin başlıcaları arasında gazlaştırma, piroliz, karbonizasyon & kavurma, hidrotermal sıvılaştırma, süperkritik dönüşüm prosesleri yer almaktadır. Biyokütlenin termokimyasal dönüşümü, hem proses hem de sistem bazında fosil kaynaklar ile karşılaştırıldığında büyük farklılıklar göstermektedir. Biyokütle ile fosil kaynaklar arasında bileşim bakımından en büyük fark oksijen içeriğinden gelmektedir. Biyoküttele çeşidine bağlı olarak %wt 10-45 arasında oksijen içermektedir. Yüksek oksijen içeriği biyokütlenin kalorifik değeri düşürmektedir. Biyokütle lifli, hidrofilik ve heterojen formdadır. Bu özellikleri nedeniyle biyokütle dönüşüm teknolojilerinde öğütme, peletleme vb. zorluklar yaşanmaktadır. Biyokütlenin toplanması ve nakliyesi de son ürün ve/veya enerji üretim maliyetini arttıran önemli bir faktördür.

Hidrotermal karbonizasyon: Hidrotermal sıvılaştırma (HTL), oldukça düşük oksijen içeriğine sahip yüksek viskoziteli sıvı ürün elde etmek için başvurulan bir termokimyasal prostestir. Nispeten düşük sıcaklıktaki bir termokimyasal işlem (180–250 °C) olup, çok çeşitli nem

içeriğindeki biyokütle ve atıklar için uygulanabilir olması nedeniyle tercih edilmektedir. Arıtma çamuru ve gübre gibi düşük/negatif maliyetli ama aynı zamanda düşük kaliteli hammaddeler hidrotermal sıvılaştırma yoluyla işlenebilmektedir.

Piroliz: Piroliz, oksijensiz ortamda ve tercihen inert atmosferde gerçekleşen termal bozunma prosesidir. Piroliz sonucu pirolitik sıvı (piroliz yağı), biyoçar ve piroliz gazı elde edilmektedir. Katalizörlü veya katalizörsüz gerçekleştirilebilmektedir. Piroliz yavaş, hızlı ve flaş piroliz olmak üzere temelde üçe ayrılmaktadır. Yavaş piroliz düşük sıcaklık (400-700 °C), düşük ısıtma hızı (0.1-1°C/s) ve uzun alıkonma sürelerinde gerçekleşmekte olup, katı ürün (odun kömürü) verimi yüksektir. Hızlı ve flaş pirolizde ise sıvı ürün verimi yüksektir. Hızlı ve flaş piroliz ise sırasıyla 400-500° ve 800-1000°C sıcaklık aralıklarında ve 10-200°C/s ve 1000°C/s ısıtma hızlarında gerçekleşmektedir.

Kavurma (torrefikasyon): Kavurma işlemi biyokütleyle bağlı olarak 250-350°C aralığında gerçekleştirilen bir ön piroliz işlemidir. Kavurma işlemi ile biyokütle, uçucu bileşen içeriğinin bir kısmını kaybetmekte, yüzey fonksiyonel grupları değişmekte ve hidrofilik bir yapıdan hidrofobik bir yapıya dönüşmektedir. Kavurma işlemi ile biyokütlenin enerji yoğunluğu artmakta, hidrofobik bir yapıya dönüştüğü için depolama aşamasında bozunma daha yavaş ilerlemekte, daha az enerji ile öğütülebilir bir gevrekliğe ulaşmakta ve dolayısıyla öğütme ve peletlemede kolaylık sağlanmaktadır. Kavurmanın sağladığı bu iyileştirmeler sayesinde biyokütle nakliye masraflarını azaltmakta, termokimyasal dönüşüm proseslerine daha sorunsuz besleme yapılmakta ve termokimyasal dönüşüm verimleri artmaktadır.

Gazlaştırma: Gazlaştırma katı organik maddelerin sentez gazına (ağırlıklı olarak karbon monoksit-hidrojen içeren gaz karışımı) dönüştürüldüğü bir termokimyasal dönüşüm prosesidir. Gazlaştırma için hava, oksijen, su buharı, karbondioksit gibi farklı oksidasyon ajanları kullanılmaktadır. Gazlaştırma prosesinde kısmi oksidasyon, piroliz ve su buharı ile reformlama gibi birçok reaksiyon gerçekleşmektedir. Gazlaştırma teknolojisine bağlı olarak (akışkan yatak, sürüklemeli, sabit yatak gazlaştırma vb.) operasyon sıcaklığı 800-1400 °C arasında değişmektedir. Biyokütlenin kullanıldığı çok sayıda gazlaştırma teknolojisi bulunmaktadır. Büyük ölçekli uygulamalar için en uygun olanlar: sürüklemeli akış gazlaştırma (Entrained flow gasifier; EFG, daha yüksek sıcaklıklar ve çok küçük parçacıklar) ve akışkan yatak gazlaştırmadır (fluidized bed gasifier, FBG, daha düşük sıcaklıklar ve daha büyük parçacıklar). Akışkan yatak gazlaştırma biyokütlenin heterojen yapısı ve iyi bir ısı transferi sağlaması nedeniyle biyokütle ve atıklar için daha uygun bir seçimdir.

Hidrotermal karbonizasyon: Hidrotermal karbonizasyon (HTC), ıslak biyokütle ve atıkları hidroçar'a dönüştürmek için uygulanan bir termokimyasal dönüşüm prosesidir. HTC, otojen (otomatik olarak üretilen) basınç altında 180 ila 250°C arasındaki sıcaklıklarda ve otoklav tipi

reaktörlerde gerçekleştirilmektedir. HTC prosesinde genel olarak %50-80 katı, %5-20 sıvı, %2-5 oranında gaz ürün verimi elde edilmektedir.

Sentez gazı biyorafineri uygulamaları-sentetik yakıt ve kimyasal üretimi

Sentez gazı, kimyasal sentezlerde önemli bir ara ürün olan ve H₂ ve CO'ten oluşan bir gaz karışımıdır. Sentez gazı; doğalgaz, kömür, petrol ve türevleri, biyokütle ve organik atıklar olmak üzere karbon ve hidrojen içeren çeşitli kaynaklardan üretilmektedir. Ham sentez gazı, gazlaştırma koşullarına ve gazlaştırılan hammaddenin özelliklerine bağlı olarak, H₂ ve CO yanı sıra, değişen konsantrasyonlarda H₂O, CO₂, CH₄, N₂, azotlu bileşikler (NH₃, HCN), kükürlü bileşikler (H₂S, COS), alkali ve halojenikler vb. bileşikleri de içermektedir. Sentez gazının kalite ve kompozisyon gereksinimleri elde edilecek olan son ürüne ve kullanılacak katalizörün gerekliliklerine bağlı olarak değişmektedir (Tablo 2.3). Bu nedenle sentez gazının gaz temizleme ve gaz şartlandırma işleminden geçirilerek sentetik yakıt ve kimyasal üretimine hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

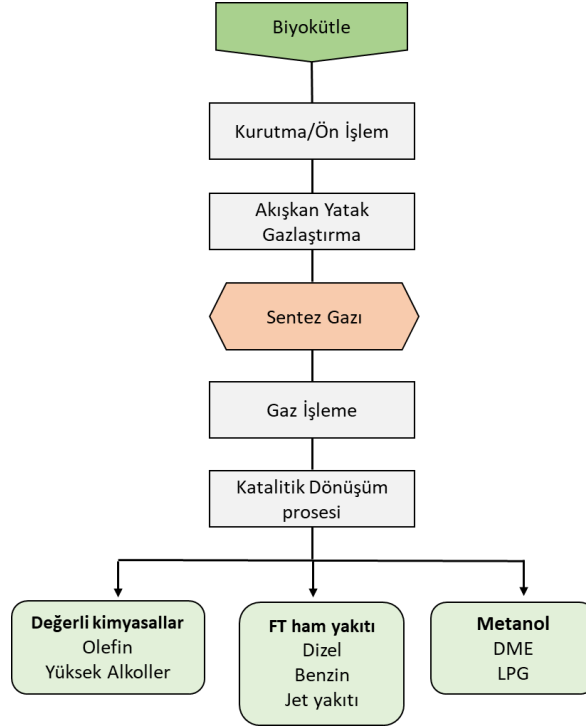
Sentez gazından Fischer-Tropsch prosesi ile sentetik yakıtlar ve vakslar elde edilirken, sentez gazından üretilen metanol üzerinden dimetil eter, formaldehit, asetik asit üretimi de mümkündür. Metanolden olefin üretim prosesi de ticari bir proses olup, bu şekilde üretilen olefinler plastik sektörünün yapı taşlarını oluşturmaktadır. Sentez gazından hidrojen, sentetik metan veya sıvılaştırılmış doğal gaz üretimi de gerçekleştirilmektedir. Sentez gazından katalitik kimyasal dönüşüm prosesleri ya da fermantasyon ile etanol veya yüksek alkoller de üretilmektedir. Biyokütleden sentez gazı ve sentez gazı kullanımı ile kimyasal/sentetik yakıt üretimini gösteren akış diyagramı Şekil 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Sentez Gazına Dayalı Biyorafinerilerde Üretilebilecek Kimyasallar, Kullanılan Katalizörler Ve Proses Gereksinimleri

Biyoyakıt	Basınç (bar)	Sıcaklık (°C)	Katalizör	H ₂ /CO (mol/mol)	CO ₂
Metanol	250-300	350-450	ZnO/Cr ₂ O ₃	3	4-8% v/v
	50-100	200-300	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃	2	
Etanol ⁺	55-65	230-300	Rh katalizörleri MoS ₂ veya	2	<1-5 mol % <5 mol %
	70-105			≅1-1,2	
DME	metanol sentezi	metanol sentezi	γ-Al ₂ O ₃ katalizörleri; katkılar ile metanol sentezi	≅1	metanol sentezi; H ₂ /CO ₂ = 3 ^{55,#}
	30-70	200-300	Bifonksiyonel katalizörler (CuO-ZnO-MnO ve zeolit)	≅2; 3 ⁵	CO ₂ /(CO + CO ₂) < 0,25 [#]
FTS	10-40	300-350	Fe katalizörü Co katalizörü	0,6-1,7; 2 [*]	H ₂ /CO ₂ = 1 [#] ; 3 ^{#,*} H ₂ /CO ₂ = 3 [#]
	7-12	200-240		2,0-2,15	
Hidrojen	1-30	200-1100	Ni, Fe, Mo katalizörleri	≥2 [†]	-
SNG	1-25	200-450	Ni (çoğunlukla), Co, Fe, Ru katalizörleri	≥3	H ₂ /CO ₂ = 4 [#]

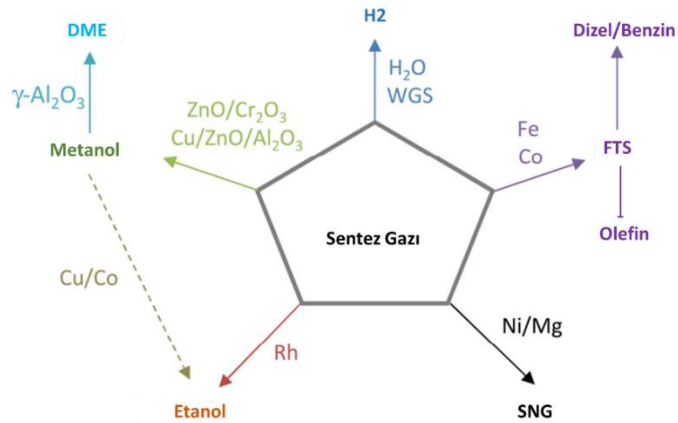
[#] Birimi = mol/mol; [†] H₂O/CO; ⁵ H₂/(CO + CO₂); ⁵⁵ CO₂ hidrojenasyonu ile metanol sentezi; ^{*} Syngas'ın etanole doğrudan dönüşümü;
^{*} Promotör olarak potasyum kullanımı.

Kaynak: A. Molino, V. Larocca, S. Chianese ve D. Musmarra, 2018. *Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review, Energies*, 2018, 11, 811



Şekil 2.1. Biyokütleden sentez gazı ve sentez gazı kullanımı ile kimyasal/sentetik yakıt üretimini

Sentez gazının yakıt ve kimyasallara dönüştürüldüğü proseslerin tamamı katalitik reaksiyonlardır. İstenilen nihai ürüne bağlı olarak kullanılan katalitik proses ve kullanılan katalizörler farklılık göstermektedir. Sentez gazının yakıt ve kimyasallara katalitik dönüşüm prosesleri ve kullanılan katalizörler Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.2. Sentez gazının yakıt ve kimyasallara katalitik dönüşüm prosesleri ve kullanılan katalizörler

Kaynak: A. Molino, V. Larocca, S. Chianese ve D. Musmarra, 2018. *Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review, Energies, 2018, 11, 811*

Biyokütle gazlaştırma tesislerinde yaşanan en büyük darboğazlardan biri, katalitik proseslerde ve alt ünitelerde koklaşma, tıkanma vb. pek çok probleme yol açan katran giderimidir. Ayrıca ardışık katalitik prosesleri de kullanılan katalizörlerin kirlenme toleransları da son derece düşüktür. Bu proseslerde kullanılan katalizörler özellikle kükürlü ve klorlu bileşiklerden kolaylıkla zehirlenmektedir. Katalizör zehirlenmesi, katalizör ömrünü azaltmakta ve proses ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Sentez gazında bulunabilecek bu kirlenmelerin azaltılmasına yönelik olarak gazlaştırma prosesinde yapılabilecek modifikasyonlar ve işletme koşullarının değiştirilmesi ile toplam tesis yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılması önemlidir.

Sentez gazı dönüşüm prosesleri hidrojenasyon reaksiyonlarına dayanmakta olup, yüksek basınç ve sıcaklık şartlarında çalıştırılmaktadır. Reaksiyon ısısının uzaklaştırılması ve bu ısının mümkünse geri kazanımı katalitik proses veriminin iyileştirilmesi ve proses ekonomisi için gereklidir.

Gazlaştırma öncesi biyokütlenin kavurma yada piroliz işlemine tabi tutulması ile gazlaştırma besleme sisteminde kolaylık sağlanmakta ve gazlaştırma verimi artmaktadır. Bu nedenle kavurma ve piroliz gibi termokimyasal prosesler ile gazlaştırma prosesinin entegrasyonunu sağlayacak yeni proses konfigürasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Kömür ve biyokütle küllerinin farklı miktarda ve kompozisyonda olması da gazlaştırıcı operasyonunu ve tasarımını etkilemektedir. Biyokütle külü gazlaştırıcıda farklı cüraf davranışı göstermekte ve refraktör malzemesinin daha çabuk yıpranmasına neden olmaktadır. Bu durum biyokütle gazlaştırıcı tasarımlarında dikkate alınmalıdır.

Piroliz yağı biyorafineri uygulamaları

Konvansiyonel pirolizde piroliz yağı ana üründür ve farklı şekillerde değerlendirilebilmektedir. Örneğin piroliz yağı sentez gazı elde etmek üzere gazlaştırılmakta ve çeşitli kimyasallara ve yakıtlara katalitik olarak dönüştürülebilmektedir. Piroliz yağı, alternatif olarak, petrol rafinerilerine iletilmekte ve hidro-işlem veya kraking ile biyoyakıt, kimyasal hammadde (örn. nafta) ve kimyasal yapı taşları (örn. propilen) üretilebilmektedir. Piroliz yağı yapıştırıcı/reçinelerde de kullanım alanı bulmaktadır. Piroliz yağı fenolik açıdan zengindir. Bu nedenle ekstraksiyon ile fenol formaldehit reçinelerinin üretimi için fenolik bileşikler elde edilebilmektedir. Piroliz yağının diğer bir uygulama alanı da çatı ve yollarda kullanılabilecek

asfalt ilavesidir. Bunun için piroliz yağının lignin fraksiyonu ayrılmakta ve bitüm ikamesi için kullanılmaktadır. Son olarak, piroliz yağından levoglukosan ekstrakte edilerek hidrolizasyonu ile birçok kimyasala dönüştürülebilmektedir.

Piroliz prosesinde farklı katalizörler ve uygun piroliz koşullarının seçimi, katma değerli hedef ürünlerin (LGO (levoglucosenone), furfurallar, fenol, aromatikler, vb.) seçici olarak ve yüksek verim ile üretimini sağlamaktadır. Yüksek katma değere sahip ürün elde etmek için katalizör yapısı-piroliz koşulları-hedef ürün arasındaki ilişkinin aydınlatılması ve doğrultuda yeni katalizörlerin geliştirilmesi önemlidir.

Piroliz prosesi endotermik reaksiyonlar ile gerçekleştiğinden reaksiyon ısı talebinin karşılanması için güneş enerjisi, plazma veya mikrodalga ile ısıtma gibi yeni ısıtma teknolojilerinin uygulanabilirliği proses ekonomisi açısından önemlidir.

Biyokütle piroliz sistemlerinin optimizasyonu için enerji verimliliği, çevresel etki değerlendirme ve CO₂ azaltma teknolojilerinin entegrasyonu göz önünde bulundurulmalıdır.

Piroliz sonucu elde edilen piroliz yağının kullanımının önündeki en büyük engel oksijen içeriği ve korozif yapısıdır. Yüksek su içeriği nedeniyle biyokütle pirolizinden elde edilen piroliz yağının enerji yoğunluğu petrol yakıtlarının enerji yoğunluğunun yarısı kadardır. Piroliz yağından oksijenli bileşiklerin ve suyun ekonomik ve etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına yönelik katalitik proseslerin ve membran gibi yenilikçi ayırma sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Thermokimyasal Dönüşüm Proseslerine Dayalı Biyoçar Üretim ve Uygulamaları

Biyoçar yan ürün olarak toprak iyileştirmede değerlendirilmektedir. Biyoçardan hava ve atık su arıtma sistemlerinde kullanılmak üzere adsorbanlar (aktif karbon) da üretilmektedir

Biyoçar üretim verimini artırmak ve farklı hammaddelere özgü biyoçar üretim proseslerini geliştirmek üzere kavurma ve/veya karbonizasyon koşullarına bağlı olarak değişen malzeme özellikleri belirlenmelidir.

Fonksiyonel biyoçar elde etmek için piroliz, aktivasyon ve modifikasyon aşamaları ardışık olarak gerçekleştirilmektedir. Fonksiyonel karbon malzemelerin verimli bir şekilde üretimi için bu aşamalara ait mekanizmaların çözümlenmesi gerekmektedir. Aktivasyon ve modifikasyon aşamalarında kullanılan kimyasalların da çevre dostu yeşil kimyasallar olması, üretim prosesinin minimum kirletici emisyonu ile gerçekleştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

Thermokimyasal Dönüşüm Proseslerine Dayalı Biyorafineri Uygulamalarında Öncelikli Ar&Ge Konuları

Özetle yukarıda bahsedilen termokimyasal biyorafinerilerde aşağıda verilen darboğazlar bulunmaktadır:

- Demonstrasyon ve ticarileşme öncesi ölçekte teknoloji doğrulama faaliyetleri pahalıdır.
- Ölçek büyütme için sınırlı mühendislik bilgisi olan araştırma ekipleri bulunmaktadır.
- Ölçek büyütme için istenen kalite ve miktarda sınırlı sayıda biyokütle mevcuttur.
- İkinci nesil biyokütleri (kalıntıları) katma değerli ürünlere dönüştürmek için uygulanan termokimyasal prosesler henüz ekonomik olarak ilgi çekici değildir.
- Enerji verimliliğini arttırmak, su kullanımını iyileştirmek ve atık üretimini azaltmak için birincil ve ikincil dönüşüm proseslerinin sınırlı entegrasyonu mevcuttur.
- Katalitik termokimyasal prosesler için (örneğin katalitik gazlaştırma, katalitik piroliz) katalizör geliştirme çalışmaları sınırlı düzeydedir. Termokimyasal dönüşüm proseslerinde hammadde esnekliğini artırmak için ilgili ürünlere karşı yüksek verim, seçicilik ve stabiliteye sahip katalizörler geliştirmek üzere Ar-Ge stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Çok çeşitli ve düşük kaliteli biyokütle hammaddelerini daha yüksek kaliteli biyo temelli ürünlere dönüştürmek için ön hazırlık teknolojilerinde (örneğin kavurma) geliştirilmeye açık alanlar bulunmaktadır.
- Enerji verimli ve ürün seçici dönüşüm proseslerinin geliştirilmesi için termokimyasal teknolojileri ile biyokimyasal dönüşüm teknolojilerinin (yani biyokimyasal) entegre edildiği çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Termokimyasal proseslere dayalı biyorafinerilerde hedeflenmesi gereken yenilikçi çalışmalar

- Biyokütle hammadde girdisine sahip olan endüstriyel tesislerde (örn. kağıt hamuru ve kağıt üretimi) açığa çıkan karbondioksit ile elektrolizden elde edilen yeşil hidrojen ile yenilenebilir metanol üretimi
- Gazlaştırma, proses parametrelerine, çar morfolojisine ve biyokütledeki inorganiklerin (potasyum, sodyum, silikon) varlığına karşı çok hassastır. Bu nedenle atıklar dahil olmak üzere çok çeşitli biyokütlerin kullanımına imkan veren esnek tasarımlara sahip gazlaştırma teknolojileri üzerine yenilikçi Ar&Ge çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.
- Yüksek sıcaklık sentez gazı temizleme teknolojilerinin geliştirilerek sentez gazı dönüşüm prosesinin toplam veriminin artırılması önem arz etmektedir.
- İkinci (lignoselülozik biyokütle kaynakları), üçüncü (mikroalgler) ve dördüncü nesil (genetiği değiştirilmiş mikroalgler) biyoyakıtların termokimyasal dönüşüm proseslerinde uygulamaları üzerine pilot ve demonstrasyon ölçeğinde çalışmalara hız verilmelidir.
- Tarımsal atıklar ve çeşitli kentsel atıklar ile ilgili olarak çok çeşitli biyokütle potansiyelini işleyebilen sağlam ve esnek lojistik sistemler (toplama, taşıma, depolama) kurulmalıdır.

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılabilecek platform kimyasalların üretilmesi

Platform kimyasalları, geniş bir ürün yelpazesinin kimyasal yapı taşları veya başlangıç malzemeleridir. Platform kimyasalları, farklı biyokütle kaynaklarından üretilen ara ürünlerdir ve geniş bir nihai ürün yelpazesi elde etmek için farklı kimyasal proseslerin girdilerini oluşturmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı Biyoenerji Çalışma Grubuna (Görev 42) göre biyoçar (piroliz ile elde edilen), biyokömür (kavurma ile elde edilen), ham bitkisel yağ, sentez gazı, biyogaz, biyohidrojen (fotoreaktör veya fermentasyon ile elde edilen), biyoafta, C5/C6 şekerleri (ksiloz, arabinoz, glikoz gibi), karbondioksit (biyojenik olarak ara ürünlere dönüştürmek üzere), lignin, organik elyaflar, ekstraksiyon ile elde edilen organik sıvılar, pirolitik sıvılar ve nişasta en önemli platform kimyasallarıdır^{5,6}.

Platform kimyasalları kullanılarak kimyasal prosesler ile çok çeşitli endüstriyel kimyasallar üretilmektedir. Platform kimyasallarından üretilen nihai kimyasallardan bazıları şunlardır: Plastikleştiriciler, alev geciktiriciler, zirai kimyasallar, etilen, propilen, laktik asit, katalizör ve enzimler, renklendiriciler (pigmentler), kozmetik ürünleri, aromalar, yağlayıcılar, gıda takviyeleri, boya ve kaplama kimyasalları, ilaç etken maddeleri, metanol, etanol, tolüen gibi çözücüler, karboksimetil nişasta gibi yüzey aktif maddeler vb^{5,6}.

Lignoselüloz esaslı biyokütle temelde selüloz, hemiselüloz ve lignin içermektedir. Fiziksel (öğütme gibi), kimyasal (asit veya alkali ön işlem, organo çözücü gibi), fizikokimyasal (buharla veya amonyakla işlem) ve biyolojik (enzimlerin kullanımı) işlemler ve ardışık hidrolizasyon işlemleri ile C5, C6 şekerleri ve lignin platform kimyasalları olarak elde edilmektedir. İkincil rafinasyonda C6 şekerleri fermente edilerek biyoetanol elde edilmektedir. İkincil ara ürün olarak elde edilen etanol, C6 şekerleri gibi, biyoplastikler gibi nihai ürünlere dönüştürülebilen önemli bir diğer platform kimyasalıdır. C6 şekerlerinden fermantasyon ve/veya kimyasal dönüşüm yoluyla suksinik asit, adipik asit, isobütanol, sorbitol, teraftalik asit, 1,4 bütandiol, laktik asit, polioller ve organik asitler gibi kimyasallar üretilmektedir. Fermentasyondan önce veya sonra ele geçen ligninin makromoleküler yapısından yararlanılarak asfalt, bağlayıcı, yapıştırıcı, karbon elyaf ve polimer kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Alternatif olarak lignin depolimerize edilerek aromatikler üretilmektedir. Bunun için hidro işlem, sıvı faz reformlama, asit/baz kataliz ve oksidasyon gibi farklı yöntemler mevcuttur. Lignin gazlaştırılarak yada piroliz edilerek sentez gazı veya pirolitik sıvı gibi diğer platform kimyasallarına dönüştürülebilmektedir. Lignin ayrıca ısı ve elektrik için yakılarak da değerlendirilebilmektedir^{5,6}.

Kolza tohumu, soya fasulyesi, ayçiçeği çekirdeği gibi yağlı tohumlardan ve meyvelerden elde edilen ham yağ da bir platform kimyasalıdır. Transesterifikasyon yoluyla ham yağ, yağ asidi metil esterlerine (FAME, biyodizel) ve gliserole dönüştürülmektedir. Ham yağdan elde edilen yağ asitleri, oleokimya endüstrisi ve yağlayıcıların üretimi için değerli bir ara maddedir. Kimyasal modifikasyonlar ile yağ asitlerinden kozmetik maddeler, yüzey aktif maddeler, boyalar ve benzeri ürünler elde edilmektedir. FAME, katalitik hidrojenasyon yoluyla yağ alkollerinin üretiminde de kullanım alanı bulmaktadır. Yağ alkollerini etoksile edilerek (yani etilen oksit ile reaksiyona sokularak) yüzey aktif maddeler üretilmektedir. Yağ alkollerini ayrıca yağ nitrillerin hidrojenasyonu yoluyla yağ aminlerine dönüştürülebilmektedir^{5,6}.

Kereste fabrikalarından çıkan talaş kalıntıları ve hammadde olarak orman yönetiminden gelen seyreltme artıklarını kullanarak hamurlaştırma işlemi ile iki ayrı platform kimyasalı olarak kağıt hamuru ve kullanılmış siyah likör üretilebilmektedir. En tipik iki kağıt hamuru prosesi, Kraft ve sülfite kağıt hamuru prosesleridir. Nanokristalin selüloz, hamurun asit hidrolizi yoluyla üretilmektedir. Kağıt hamuru üretiminde oluşan atık gazdan metanol geri kazanılabilmektedir. Benzer şekilde tall yağı ve terebentin gibi kimyasallar ve lignin de siyah likörden geri kazanılabilmektedir. Tall yağı ve terebentin ürünleri, örneğin lastiklerde, asfaltta, parfümlerde, yapıştırıcılarda ve boyalarda kullanım alanı bulmaktadır. Kullanılmış siyah likör, gazlaştırma yoluyla bir diğer platform kimyasalı olan sentez gazına dönüştürülebilmektedir. Alternatif olarak kullanılmış siyah likör, kimyasal üretiminde kullanılmak üzere değerlendirilebilmektedir. Beton ve çimento üretiminde kullanılan lignosülfonatlar sülfite liköründen geri kazanılabilmektedir. Gıdalarda ve parfümeride kullanım alanı bulan vanilin, lignosülfonatların oksidasyonu ile üretilmektedir^{5,6}.

Bir başka platform kimyasalı elde etme yöntemi, biyokütlenin preslenerek yapısındaki sıvının ekstraksiyonudur. Elde edilen sıvı, organik elyafları da içeren organik bir sıvıdır. Organik lifler işlenerek levhalar, kompozitler, yalıtım malzemeleri ve lif takviyeli polimerler üretilmektedir. Alternatif olarak hidrolizden sonra biyoyakıt ve kimyasal üretmek için fermantasyon hammaddesi olarak da değerlendirilmektedir. Organik sıvı kısmı laktik asit, proteinler ve amino asitler gibi değerli bileşenler içermektedir ve bu değerli içerik geri kazanıldıktan sonra kalan kısım biyogaz tesisine gönderilmektedir. Biyogaz tesisine gönderilen kalan kısım ve diğer ekstraksiyon aşamasından kalan organik kalıntı havasız ortamda çürütülerek biyogaz ve gübre elde edilmektedir^{5,6}.

Yukarıda bahsedilen platform kimyasallarına dayalı biyorafinerilerde aşağıda verilen darboğazlar bulunmaktadır:

- Hali hazırda biyo-bazlı 1,4 bütandiol (BDO) pazar payı düşüktür. Biyo-BDO üretiminden kaynaklanan çamurların gübre olarak değerlendirilmesine izin veren politikalar

bulunmamaktadır. Öte yandan, Avrupa ve ABD'de sürdürülebilir elyaf ve biyopolimerlere yönelik artan talep, biyo-bazlı 1,4-BDO üretimini desteklemektedir.

- AB propilen glikol (PG) üretimi dışında üretilen çoğu biyo-bazlı PG, biyodizel üretimine bağlıdır. Bu nedenle hammaddede değişken biyodizel pazarlarına bağımlılık söz konusudur. Biyo PG üretmek çok daha pahalıdır. 2018 yılında biyo-bazlı PG (gliserolden) üretmenin maliyeti 1,68 €/kg iken, fosil türevli PG maliyeti 1,01 €/kg'dır.
- Biyo bazlı yağlayıcıların yüksek maliyeti bulunmaktadır. Biyo bazlı, kimyasal olarak modifiye edilen yağların kullanımındaki en büyük engel, sentezlerinde kullanılan bitkisel yağlardan 3-5 kat daha pahalı olmalarıdır. Biyo-yaglayıcıların düşük pazar payı, motor üreticilerinin teknik özellikleri geliştirirken biyo-yaglayıcıları dikkate almadığı anlamına gelmektedir.
- Biyo bazlı solventlerin fosil eşdeğerlerinin fonksiyonel gereksinimlerini karşılaması gerekmektedir. Drop-in solventler, örn. boya formülasyonlarında, kimyasal kaynağı ne olursa olsun aynı olduğu için formülasyonun değiştirilmesine gerek olmaması avantajına sahiptir. Ancak VOC çözücülerinin farklı bir biyo-bazlı çözücü ile değiştirilmesi genellikle daha kısa kuruma süreleriyle sonuçlanmaktadır, bu da bu ürünlerle çalışmak için daha az zaman anlamına gelmektedir.
- Yüzey aktif maddeler (sümfaktanlar), kozmetikte, kişisel ve ev bakım ürünlerinde dağıtıcı maddeler ve emülgatörler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Biyo bazlı yüzey aktif madde veya biyo yüzey aktif madde için (a) yüksek düzeyde biyolojik bozunma, (b) insan ve hayvan sağlığı üzerinde etki olmaması ve (c) minimum olumsuz çevresel etki şartları sağlanmalıdır. Biyo bazlı yüzey aktif maddeler genellikle genel bileşim ve performans üzerinde bir etkiye sahip olacağı son ürün formülasyonlarında kullanılmaktadır. Bu da ürün geliştirme maliyetlerini artırmaktadır. Geleneksel yüzey aktif maddelerin bire bir ikamesi mümkün değildir ve sıklıkla yeni ürün formülasyonunun geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Platform kimyasallarına dayalı biyorafinerilerde hedeflenmesi gereken yenilikçi özellikler ve performans:

- Biyo 1,4 bütandiol üretimi için iki ticari yol bulunmaktadır: mısırdan ve lignoselülozik ham maddeden elde edilen şekerler. Lignoselülozik hammaddelerden verimli şeker ekstraksiyonu zorlu ve maliyetli bir süreçtir. Lignoselülozik hammaddelerden şeker ekstraksiyonunun iyileştirilmesi, daha fazla maliyet rekabeti için bir fırsat sunmaktadır. Süksinik asit üretimi ise zordur. Süksinik asit daha değerli bir üründür, bu da onu bir başlangıç materyali olarak uygun kılmamaktadır. Bütan ve benzenden alternatif üretim yöntemleri araştırılmalıdır.

- Gliserolün asetole ve propilen glikole katalitik dönüşümü gibi yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi önemlidir. Gliserolün propilen glikole dönüştürülmesinde yeşil hidrojen kullanımı ile sera gazı emisyonu azaltımı daha fazla sağlanabilmektedir.
- Biyo-bazlı yağlayıcıların fonksiyonel özelliklerin iyileştirilmesi üzerine, örn. yüksek kayganlık, daha düşük uçuculuk ve daha düşük yanıcılık, Ar&Ge çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu problem katkı maddeleri ile çözülebilir, ancak kullanılacak katkı maddeleri biyo-bazlı ve biyolojik olarak parçalanabilir olmalıdır. Bu doğrultuda süksinik asit, adipik asit, propilen oksit, etilen oksit gibi biyo-bazlı katkıları, yağlayıcıların biyo içeriğini artırma fırsatı sunmaktadır.
- Boyalarda ve kaplamalarda fosil türevli alternatiflerin yerini alacak biyo bazlı bir çözücünün performans uygulamalarına odaklanan Ar-Ge çalışmaları gereklidir. Ayrıca zirai kimyasal üretiminde kullanılmak üzere çeşitli aktif bileşenlerle uyumluluk gösteren yalnızca birkaç biyo-bazlı çözücü mevcuttur. Üstün işlevselliğe sahip zirai kimyasallar için biyo-çözücüler geliştirmek üzere Ar-Ge ve inovasyona daha fazla yatırım yapılması gerekmektedir. Biyo-çözücülerin gıda vasfı taşıyan biyokütle yerine lignoselülozik biyokütleden eldesine yönelik prosesler önem arz etmektedir.
- Bitkisel yağların etoksilasyonu ile üretilebilen %100 yenilenebilir biyo-bazlı yüzey aktif maddelerin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktıların (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Sürdürülebilir ve yenilenebilir yakıt ihtiyacı, CO₂ emisyonu kaynaklı iklim değişikliğini engellemek için bir zorunluluktur. Çevresel protokoller gereği olarak temiz ve sürdürülebilir enerji kaynağına ulaşmak dünyanın temel araştırma ve geliştirme konusudur. CO₂ emisyonlarını azaltmak üzere endüstriyel boyutta alınabilecek önlemler olmakla birlikte çevre yönetimi ile de çeşitli önlemlerin alınması mümkündür. Organik atıkların arıtılması, zirai atıkların yakılması ya da doğaya bırakılması kontrolsüz olarak karbon salınımına neden olduğundan iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu kontrolsüz karbon salınımını engellemek üzere organik atıkların yapılarında depolanmış olan solar enerjinin biyolojik yöntemlerle kullanılabilir enerji haline dönüştürülmesi mümkündür.

Lignosellülozik yapıdaki tarımsal atıklar, evsel katı atıklar, pazar atıkları ve gıda endüstrisi atıkları gibi karbonhidratça zengin ve özellikle ülkemizde atık potansiyeli yüksek olan hammaddeler kullanılmalıdır. Üçüncü nesil substrat olarak mikro alglerin kullanılması ise son 10 yılın yaklaşımıdır. Denizlerde yayılımcı olarak büyüyen ve önemli bir deniz kirliliğine neden olan makro alglerin kullanılması ise son yılların yenilikçi yaklaşımıdır. Mikro ve makro alglerin biyohidrojen üretiminde kullanılması ile sera gazı emisyonu yerine atmosferde biriken CO₂ döngüsü sağlanacak ve karbon nötr bir sistem geliştirilmiş olacaktır.

Lignosellülozik ve alg gibi biyokütlerden fermentasyon teknolojileri ile biyoetanol ve biyobütanol gibi sıvı yakıtlar, biyometan ve biyohidrojen gibi gaz yakıtların üretimi sağlanmaktadır [1-3]. Biyoetanol ve biyometan bu alanda en iyi bilinen biyoyakıt türleri olmakla birlikte, temiz ve geleceğin enerji kaynağı biyohidrojendir. Biyoetanole alternatif olarak biyobütanol üretimi gelişmeye açık bir alandır [4,5].

Fermentasyonla sıvı ve gaz yakıtların eldesinde organizmalar C6 şekerleri tercih etmektedir. Ancak son yıllarda biyokütlenin katma değeri yüksek ürün ve enerji üretimine yönelik yürütülen yoğun araştırma çalışmalarıyla C5 şekerlerinin de fermente edilebildiği görülmüştür [6,7]. Özellikle lignosellülozik biyokütlenin hemiselüloz yapısını oluşturan C5 şekerlerinin hammadde kaynağı olarak katkı sağlaması ile biyokütlenin karbon yapısının ürüne yönelik daha etkin kullanılması sözkonusudur. Çok kısıtlı sayıda bakteri selüloz ve hemiselülozu doğrudan karbon kaynağı olarak kullanabilmektedir. Üretim hızını arttırmak üzere lignosellülozik ya da alg gibi kompleks biyokütlenin fiziksel, kimyasal ya da biyolojik ön işlemlerle fermente edilebilir basit şekerlere ya da karbonhidratlara dönüştürülmesi gereklidir [1,4]. Bu nedenle, biyokimyasal yöntemlerle sıvı ve gaz atıkların üretiminde birinci basamak ön işlemlerle biyokütlenin hidrolizidir. Ancak, ön işlemler proses maliyetini arttıran ve işletimini zorlaştıran bir basamaktır. Asidik ya da alkali kimyasal ön işlemler sonucunda oluşan toksik ürünler fermantasyon hızını ve verimini olumsuz etkilemektedir. Mikrodalga, ultrasonikasyon, buharla patlatma vb. ön işlemler ise enerji ihtiyacı yüksek olan yöntemlerdir. Bu nedenle biyokütlenin enerjiye biyodönüşümünde birinci basamak olan ön işlemlerde kullanılan kimyasal ve fiziksel ya da enzimatik yöntemlerin yerine, sellüloz-hemiselüloz ve ligninin eş zamanlı ayrımını sağlayacak, toksik madde oluşturmayacak ve ılımlı çevresel şartlarda uygulanabilecek hidroliz yöntemleri geliştirilmelidir. Bunun dışında, ön işlemsiz eş zamanlı biyolojik hidroliz ve fermantasyon teknolojilerinin geliştirilmesine de ihtiyaç vardır.

Biyokütleden biyohidrojen üretimi karanlık ve ışıklı fermantasyonla gerçekleşmektedir. Karanlık fermantasyonla hidrojen üretimi, *Clostridium* bakteri türleri ile basit şekerlerin asetik, butirik gibi organik asitlere dönüşümü sırasında açığa çıkmaktadır. Işıklı fermantasyon fotosentetik bakterilerle anaerobik şartlarda ve ışık varlığında gerçekleşmektedir [8-11]. *Rhodobakter* türü fotosentetik bakteriler basit şekerleri ve asetik, butirik, laktik gibi organik

asitleri karbon kaynağı olarak kullanarak hidrojen üretimi yapmaktadırlar [12-14]. Karanlık fermentasyon üretim şartlarının basitliği, üretim verimi ve hızı açısından ışıklı fermantasyona nazaran tercih edilmektedir. Karanlık fermentasyon sonucunda organik asitçe zengin sıvı faz metan üretimi için gerekli olan organik asit ihtiyacını karşılayacak niteliktedir. Bu nedenle, iki aşamalı ardışık biyohidrojen-biyometan (biyohitan) üretimi prosesleri ile biyokütlenin tamamıyla enerji kaynağına dönüştürülmesi mümkündür [15,16]. Biyohidrojen üretiminde mevcut teknoloji seviyesi laboratuvar ölçeğinde biyokütle türü, uygulanan ön işlemler, fermantasyon yaklaşımı, organizma türü ile biyoreaktör sisteminin geliştirilmesi aşamasındadır. Bu alanlarda bilimsel seviyede yüksek oranda çalışmalar mevcuttur. Temel yaklaşım ön işlemlerin ardından karanlık fermantasyonla tam karışımly ya da bağıly büyüme biyoreaktörlerde üretimin sağlanması için işletim şartlarının belirlenmesidir. Hedef ise üretim verimini ve üretim hızını arttırmaktır. Teorik olarak üretim verimi karanlık fermantasyonda glikozun asetik aside dönüşmesi durumunda 4 mol H₂/ mol glikoz, butirik asit oluşumunda ise 2 mol H₂/mol glikoz'dur. Literatürde kabul edilen verim katsayısı 2.5-3.0 mol H₂/mol glikozdur [9-11]. Üretim hızı ise substrat türüne, fermantasyon teknoloji ile işletim şartlarına göre değişiklik göstermektedir. Oluşan toplam gaz içinde H₂ yüzdesi %80'e kadar çıkmaktadır [17]. Proses verimini arttırmak ve organik atıkların tamamen CO₂'e dönüşümünü sağlamak üzere ikinci basamak olarak biyometan prosesi uygulanarak %75'e varan saflıkta metan üretimi elde edilebilir [15,16, 18]. Ardışık biyohidrojen-biyometan prosesi ile gaz karışımı sonucunda enerji değeri yüksek ve doğrudan yakılabilen ya da elektrığe dönüştürülebilen "biyohitan" elde edilmiş olacaktır. Biyohidrojen oluşumunu etkileyen faktörlerden biri üretim sırasında açığa çıkan organik asitlerle pH'ın düşmesi sonucunda mikroorganizma faaliyetlerinin yavaşlaması ve hidrojen üretiminin durmasıdır. Sürekli işletilen biyoproses teknolojileri ile bu sorun kısmen aşılsa bile yüksek başlangıç substrat derişimlerinde organik asit oluşumunda da artış meydana gelmesinden dolayı ürün inhibisyonu meydana gelmekte ve hidrojen üretimi yavaşlamakta ya da durmaktadır. Biyohidrojen üretiminde en önemli faktörlerden biri de oluşan organik asit türüdür. Ürün verimini arttırmak için, metabolizmanın asetik aside yönlendirilmesi gereklidir. Propiyonik ve laktik asit gibi hidrojen tüketen ya da hidrojen üretmeyen organik asitlerin oluşumu engellenmelidir. Bu amaçla, genetiğı değiştirilmiş bakteri kültürlerinin kullanılması ya da metabolik yol izlerinin asetik ve butirik aside yönlendirilmesi için manipülasyonların yapılması gereklidir.

Fermentasyon teknolojileri ile biyoetanol üretimi de teknolojik olarak uygulanmaktadır ve enerji marketinde yerini almıştır. Biyoetanol maya, fungi ve bakterilerle anerobik şartlarda gerçekleşmektedir. Organizmaların tolere edebildiğı maksimum başlangıç şeker derişimi, genel olarak, 100 g/L ve etanol üretim sınır derişimi ise 50 g/L'dir [19]. Biyoetanol üretimi endüstrileşmiştir, Amerika Birleşik Devletleri ve Brezilya bu alanda lider durumdadır [20, 21] Afrika ve Asya'da hızla gelişme göstermektedir [22]. Biyobütanol ise henüz enerji sektöründe

yerini almamış olmakla birlikte yakıt olarak kullanılabilen alternatif bir enerji kaynağıdır. Biyobütanol üretimi anaerobik şartlarda aseton/bütanol/etanol (ABE) fermantasyonu ile gerçekleşmektedir. Biyobütanol, benzine benzer niteliklere sahip tek biyoyakıt olduğundan benzine alternatifi bir biyoyakıt olarak değerlendirilmektedir [23]. Bütanol enerji kaynağı olmasının yanı sıra kozmetik, ilaç endüstrisinde ve ayrıca butilakrilat ve metakrilat üretim için solvent, kimyasal ara madde ve özütleyici olarak, endüstrilerde daha çok plastik, aside dayanıklı vernik ve çabuk kuruyan otomobil boyaalarının üretiliminde de kullanılmaktadır. Ayrıca boya inceltici ve çözücüsü, fren sıvıları, ilaç ve antibiyotik, hormon, vitamin gibi doğal maddelerin üretiminde ekstrakte edici alkoldür. İçten yanmalı motorlarda doğrudan veya benzinle çeşitli oranlarda karıştırılarak kullanılması mümkündür [23, 24]. 1-bütanol (veya n-bütanol), izobütanol ve tertiary-bütanol benzin katkı maddesi olarak kullanılabilirken n-bütanolün benzin ile kolaylıkla karıştırılabilir. Araba motorlarında herhangi bir değişiklik olmadan tamamen petrol yerine kullanılması Environmental Energy Company (US) tarafından onaylanmıştır. Aseton/ etanol/ bütanol fermentasyonunda A:B:E= 3:6:1 oranında karışım açığa çıkmaktadır. Bakteriyel üretimde tolere edilebilen başlangıç şekere derişimi 60 g/L civarındadır. ABE derişimi 20 g/L'ye ulaşmakta ve bu karışım içinde bütanol derişimi ise 7 g/L civarında gerçekleşmektedir. Ancak metabolik yol izlerinin iyileştirmesi, fermantasyon teknolojisinin uygulanması ile biyobütanol derişimi 20 g/L'ye kadar ulaşmaktadır [25]. Etanole nazaran daha düşük derişimlerde ürün eldesi biyobütanol üretiminin kısıtlayıcı faktördür. Üretimin düşük kalmasının sebebi ise fermentasyon ortamında ABE derişiminin 20 g/L'ye ulaşması ile birlikte mikroorganizma membranının lipid ve protein yapısının çözücü etkisi ile bozunmasıdır. Eş zamanlı üretim ve ayırma teknolojilerinin uygulanması ile üretim veriminde ve miktarında artış sağlanabilir [26-28]. Biyobütanol üretiminde iyileştirilmesi gereken diğer bir alan ise metabolizmanın aseton ya da etanol yerine bütanol üretimine yönlendirilmesidir. Diğer bir ifade ile üretim bütanol lehine yönlendirilmesi için ilgili enzim aktivitesini artırıcı ve genetiği iyileştirilmiş organizmaların geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

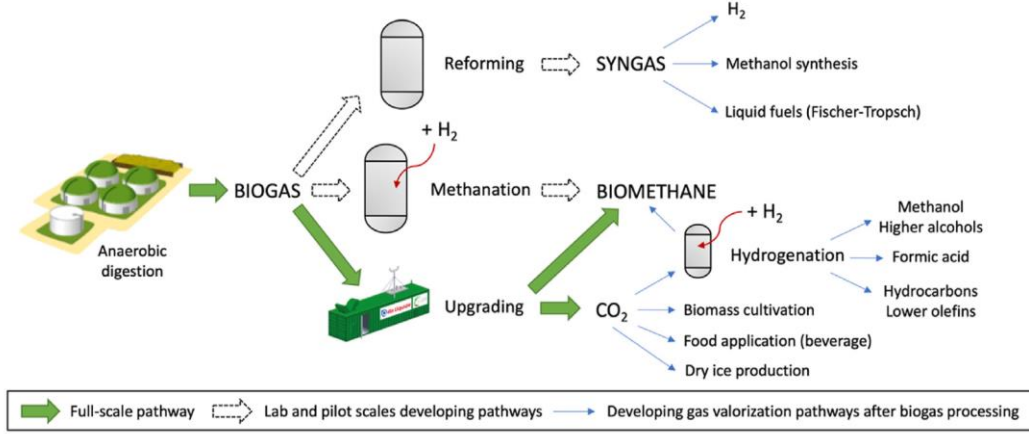
Anaerobik parçalanma (AD) prosesi ile biyometan üretimi, biyobazlı endüstrilerin sürdürülebilir gelişimi için umut verici bir diğer stratejidir. Anaerobik parçalanma, atık yönetimi ve biyoenerji üretimi olmak üzere iki önemli avantaj içeren organik madde dönüşümü sağlayan biyolojik bir süreçtir. Dünya Biyogaz Birliği, 2018'de dünya çapında yaklaşık 132.000 anaerobik reaktörün ve 2019'un sonunda Avrupa'da 18.943 adet anaerobik reaktörün çalıştığı bildirilmiştir. Ayrıca, 50 milyon adet mikro ölçekli reaktörün (reaktör boyutu: 0,2–100 m³) hanelere ve küçük topluluklara hizmet vermek üzere çalıştığı tahmin edilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansına göre, 2018'de biyogaz ve biyometan üretimi yaklaşık 35 milyon ton petrol eşdeğeri (Mtep) olarak hesaplanmıştır. Üretilen bu miktar, sürdürülebilir atık hammaddelerin dünya çapında mevcudiyeti dikkate alındığında tahmin edilen toplam potansiyelin (730 Mtep) yalnızca sınırlı

bir kısımdır. AD proseslerinin uygulanmasının, anaerobik reaktörlerin üretilmesiyle birlikte dünya çapında daha da artması beklenmektedir.

AB-27'deki biyogaz endüstrisi, 2020'de 5,75 milyar € ciro yapmıştır. Bu, hidroelektrik endüstrisinden (4,65 milyar €) nispeten daha yüksektir. 2020 itibarıyla Avrupa'da yaklaşık 19.000 biyogaz tesisi ve 725 biyometan tesisi bulunmaktadır. 2020 yılında yaklaşık 167TWh biyogaz ve 26TWh biyometan üretilmiştir. 2021 yılında ise kombine biyogaz ve biyometan üretimi 196 TWh veya 18,4 bcm ulaşmıştır. **Biyogaz endüstrisi son on yılda durgunlaşırken, biyometan üretimi büyümeye devam etmiştir.** Bu rakam 2021'de %20'lik bir artışı temsil ederek 37 TWh veya 3,5 bcm'ye yükselmiştir. Son on yılda, biyogazdan dağıtılabilir güç ve ısının üretilmesi çok önemli olmuştur ve rolü bir dereceye kadar devam edecektir. Bununla birlikte, mevcut eğilim doğrudan biyometan üretimine odaklanmaktadır ve bu eğilimin önümüzdeki on yılda güçlenmesi beklenmektedir: biyometan çok yönlü bir enerji taşıyıcısıdır ve ulaşım, endüstri, ısıtma da dahil olmak üzere bir çok sektör için uygundur. Toplam biyogaz üretiminin 2030 yılına kadar 467 TWh'ye çıkacağı ve bunun yaklaşık 117 TWh'sinin karayolu taşımacılığı sektöründe kullanılacağı tahmin edilmektedir. Üretilen biyometan miktarı ile Avrupa'da yaklaşık 13,2 milyon doğal gazla çalışan araç filosundaki biyometan kullanım payının artıracığı tahmin edilmektedir.

Anaerobik parçalanma prosesi ve biyogaz üretimi endüstriyel olarak gelişimini genel anlamda tamamlamış olmakla birlikte biyogaz tesisi enerji verimliliğini artırmak için ön işlem (mekanik, termal, kimyasal ve biyolojik) prosesleri ve elektron transferini artıran katkı maddelerinin anaerobik reaktörlere ilavesi araştırma ve teknoloji geliştirilmesi gereken umut verici yöntemlerdir. Ön işlem proseslerinin uygulanması ile gözlenen metan üretim verim artışı çalışmaları genellikle küçük laboratuvar ölçekli çalışmadır. Büyük ölçekte, uzun süreli ve tüm parametrelerin kontrol edildiği ve izlendiği (hammadeler, pH, sıcaklık, karıştırma, gaz akışları ve diğer parametreler) sürekli sistem pilot çalışmalarının yapılması ve teknoloji geliştirilmesi değerli olacaktır.

Biyogazın elektrik ve ısı enerjisi dışında gelecekteki potansiyel kullanım alanları Şekil 2.3'de verilmiştir. Biyogazın saflaştırılmasıyla biyometan üretimi bilinen ve büyük ölçek uygulanan proseslerdir. Ancak, saflaştırma sonrasında kalan CO₂'in hidrojenasyonu metanol, yüksek alkoller, formik asit, olefinlere dönüştürülmesi, biyokütle kültürü yapılması, gıda maddesi üretimi, kuru buz üretimi konuları yeni gelişmekte olan rotalardır. Ayrıca, metanasyon ve reforming ile biyometan ve sentez gazı üreterek sentez gazından hidrojen, methanol ve Fischer Tropsch sıvı yakıtlarına geçiş konusundaki çalışmalar laboratuvar ve pilot ölçekte dir.



Şekil 2.3. Biyogazın elektrik ve ısı enerjisi dışında gelecekteki potansiyel kullanım alanları

Anaerobik prosesinden geriye kalan diğer bir yan ürün, yüksek nem içeriğine sahip konsantre organik ve inorganik madde karışımı içeren digestatdır. Digestat, besin açısından zengin yan üründür ve içeriğinde mikrobiyal biyokütle ve parçalanmamış organik bileşikler, makro ve mikro besinler ve ağır metaller bulunmaktadır. Bugüne kadar digestat üretimine ilişkin istatistiksel bir veri mevcut değildir, ancak tahminlere göre EU28 için yılda %68'i tarımsal kökenli olmak üzere yaklaşık 180 milyon ton digestat üretildiği tahmin edilmektedir. Ayrıca, birleşik ısı ve güç ünitesi kullanan sistemlerde kurulu güç başına (kW) yılda 20 m³ digestat üretildiği tahmin edilmektedir. Türkiye’de toplam 106 adet biyogaz tesisi bulunmaktadır ve 12.7 milyon ton digestat üretildiği tahmin edilmektedir. Digestat kullanımı, biyogaz endüstrisinin gelecekteki genişlemesini sınırlandıracak kritik bir darboğazdır.

Hammadde bileşimi ve karakterizasyonu tarafından belirlenen digestat kalitesi, olası son kullanım uygulamasına göre tanımlanmaktadır. Tarım kökenli digestat ve aynı zamanda tarım endüstrisinden elde edilen digestat ve belediye katı atıklarından kaynağında ayrılmış biyoatık, genellikle bahçecilik ve hobi bahçıvanlığı gibi tarımda gübre ve toprak iyileştirici olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, arıtma çamuru digestatı ve karışık kentsel atığın organik fraksiyonundan elde edilen digestat genellikle yakılmakta veya depolama alanında depolanmaktadır.

Digestat bileşimi, atık türüne ve anaerobik parçalanma proses parametrelerine göre değişmektedir. Lignoselülozik atık, hayvansal gübre, aktif çamur ve diğer proteinli atıklardan üretilen digestat farklı özellikler göstermektedir ve bu nedenle standart bir digestat bileşimi yoktur. Digestat, azot (N), fosfor (P), potasyum, kalsiyum (Ca), manganez (Mn), çinko (Zn), bakır (Cu), bor (B), demir (Fe) ve nikel (Ni) gibi bazı temel eser elementler açısından zengindir. Yüksek azot ve fosfor içeriği nedeniyle tarımda besin döngülerini kapatmaya ve mineral gübrelerin dış girdilerini azaltmaya yönelik olarak digestat yüksek potansiyel sunmaktadır.

Bununla birlikte tarım arazilerinde digestat uygulamasında bazı potansiyel dezavantajlar bulunmaktadır. Kontrolsüz olarak çevre ortamlarına bırakılmaları N ve P gibi besin elementlerinin çevresel ortamlara girişine neden olmaktadır. Protein açısından zengin biyokütlenin anaerobik parçalanması sonucunda digestattaki toplam amonyak azotu (TAN) konsantrasyonu artmaktadır. N ve P kirliliğine karşı savunmasız olarak sınıflandırılan yeraltı ve yüzey sularının kirlenmesinin engellenmesi amacıyla digestat kullanımı sınırlanmaktadır. Ötröfikasyondan sorumlu olan fosfor (P)'da digestat içerisinde bulunmaktadır ve aynı şekilde endişe kaynağıdır. Ayrıca, sprey yöntemi gibi geleneksel digestat uygulama yöntemleri de amonyak, karbondioksit ve nitrozoksit emisyonlarına neden olabilmektedir.

Spesifik olarak hammadde kaynağına bağlı olarak, digestat ağır metaller, antibiyotikler, organik kirleticiler veya patojenler gibi kirleticileri de içerebilir. Özellikle arıtma çamurundan elde edilen digestat, atık sudan gelen kirleticileri biriktirme eğilimindedir ve genellikle mevzuat standartlarına göre doğrudan tarımsal kullanımını sınırlayabilen yüksek ağır metal konsantrasyonları (kuru madde bazında %0,5-2, ancak bazen %4'e kadar çıkabilmektedir) ile karakterize edilmektedir. Hayvansal gübreden üretilen digestat, ağır metallerin yanı sıra, antibiyotikleri ve farmasötikleri (üreme faaliyetlerinde kullanılan) içerebilir. Organik atıklardan elde edilen digestat (özellikle kaynağında ayrılmış evsel katı atıktan) daha az ağır metal içeriği ve patojenler, hümik ve fulvik asitlerin varlığı ve antimikrobiyal etkilere sahip uçucu yağ asitleri gibi tipik olarak daha uygun özellikler göstermektedir.

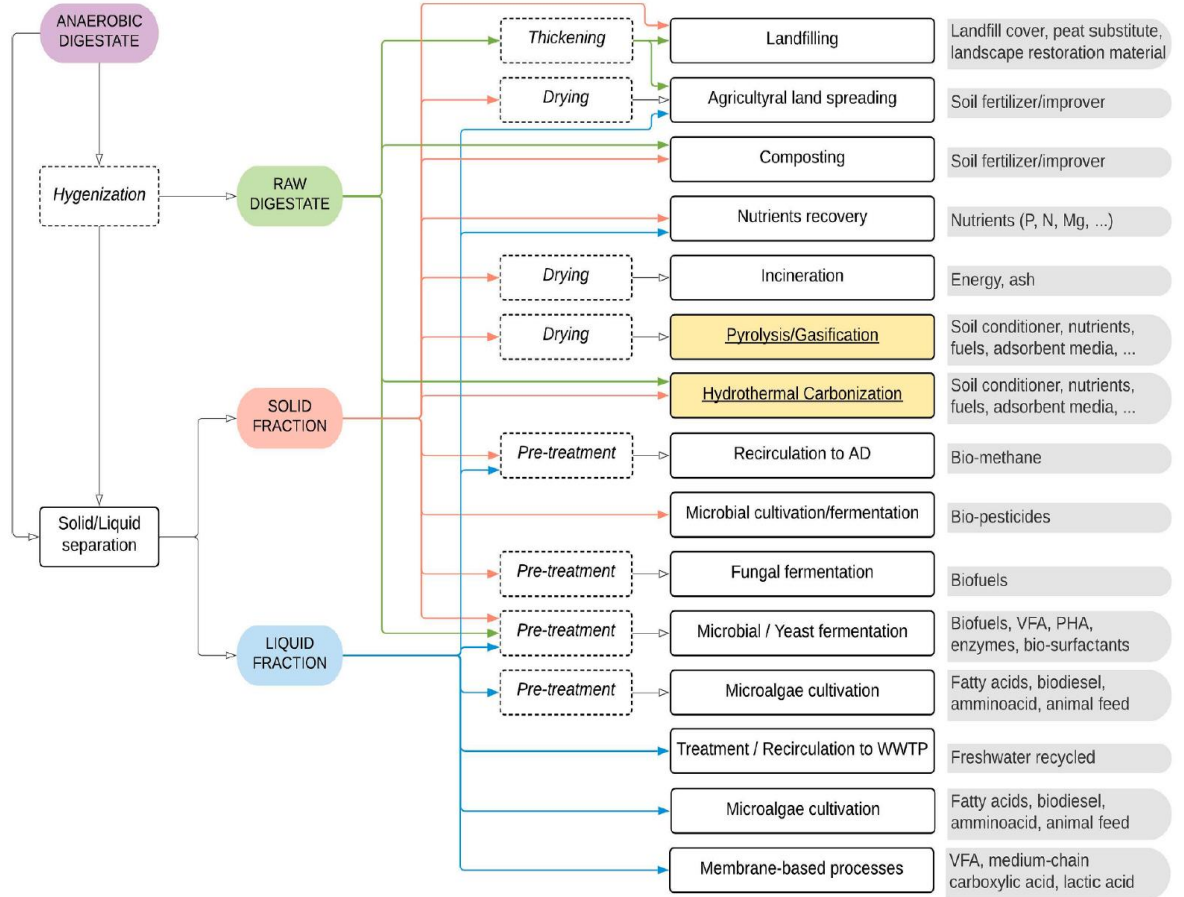
Digestat; sıvı ve katı fraksiyondan oluşmaktadır. Sıvı kısım besin (N&P) açısından zengindir, katı kısım ise toprağın hümik dengesini korur. Digestat doğrudan kullanılabilir veya katı ve sıvı fraksiyonlarına ayrılabilir. Katı-sıvı ayırma, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirir. Katı-sıvı ayrımı, plakalı basınçlı filtrasyon (filtrepres) veya santrifüj gibi mekanik işlemlerle gerçekleştirilmektedir. Digestat, vidalı pres veya dekanter santrifüj (kütlece %80-90) kullanılarak da katı ve sıvı fraksiyonlara ayrılabilir.

Katı fraksiyon, daha az su içerdiğinden kolay depolama ve taşıma avantajına sahiptir. Katı fraksiyon doğrudan tarımsal biyogübre olarak kullanılabilir ya da termal proseslerle biyokömür ve nano-selüloz gibi katma değerli ürünlere kolayca dönüştürülebilir. Sıvı fraksiyon doğrudan tarım topraklarına püskürtülebilse de, yeraltı sularının kirlenmesi önemli bir sorundur. Sıvı fraksiyonun doğrudan uygulanması; amonyağın uçmasına ve besin kaybı neden olmaktadır. Ayrıca, toprak verimliliğine zararlı olan ağır metaller ve patojenler ile toprak kontaminasyonu söz konusu olabilmektedir. Hammadde tipine (hayvansal gübre, arıtma çamuru, evsel katı atığın organik fraksiyonu) ve proses koşullarına bağlı olarak bir patojenleri inaktive etmek için hijyenizasyon adımı gerekebilir.

Şekil 2.4'de, geleneksel ve gelişmekte olan digestat yönetimi teknolojileri ve ilgili nihai ürünler sunulmuştur. Farklı çözümlerin yerel ölçekte entegrasyonu, AD enerji ve malzeme

akışlarındaki döngüyü kapatmak için gereklidir. Şekil 2.4.'den görüleceği üzere, depolama, tarım arazisinde kullanım, kompostlama, organomineral gübre üretimi, AD prosesine geri devir ile döndürme ve yakma kullanılan yaygın teknolojilerdir.

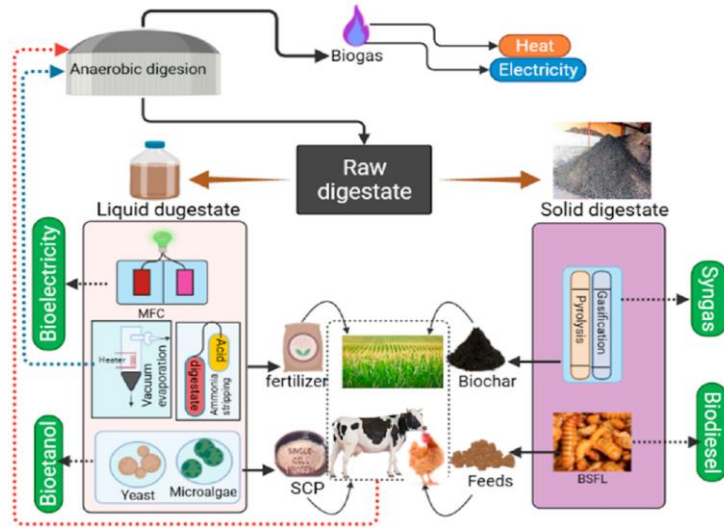
Digestat aktif anaerobik mikroorganizmalar, besinler ve biyometan potansiyeline sahip bozunmamış kalıntı organik madde içerebilir. Katı veya sıvı fraksiyonlarının bir kısmının AD reaktörlerine devridaim edilmesi, süreç performansını ve kararlılığını iyileştirmektedir. Ancak, TAN ve diğer metabolik ürünlerin potansiyel birikimi mikroorganizma inhibisyonuna yol açabilir.



Şekil 2.4. Geleneksel ve Gelişmekte Olan Digestat Yönetimi Teknolojileri ve İlgili Nihai Ürünler
 Anaerobik digestat yönetimi: Siyah çerçeveli kutular gösterirken, noktalı çizgiler isteğe bağlı işlemleri ve gri kutular son ürünleri göstermektedir.

Küresel gıda üretimini karşılamak için azotlu gübreye büyük bir talep vardır. Günümüzde dünyadaki gıda gereksinimlerinin yaklaşık %50'si endüstriyel azotlu gübrelere dayanmaktadır. Sıvı digestatda N içeriği yüksektir ve arıtma çamuru ile hayvan gübresinin, küresel azotlu gübre talebinin %15'ini karşılayabileceği tahmin edilmektedir. Digestat'dan NH_3 geri geri kazanımında; amonyak sıyırma, membran ile ayırma ve strüvit çöktürmesi olmak üzere üç

yaygın yöntem bulunmaktadır. Amonyak sıyırma tam ölçekli projede uygulanmıştır. Pilot ölçekli ve endüstriyel ölçekli testlerde bazı teknolojiler doğrulanmış olsa da, hala çözülmesi gereken birçok potansiyel sorun vardır. Amonyak sıyırma ve membran ayırma yöntemleri için, amonyak geri kazanım verimliliği, sıcaklık ve pH yükseltilebilir, ancak aynı zamanda enerji ve kimyasal tüketiminde bir artışa yol açarak işletme maliyetinde bir artışa neden olur. Bu nedenle, enerji ve malzeme tüketiminin nasıl azaltılacağı amonyak geri kazanımının zorluğudur. Son zamanlarda, enerji tüketimini azaltmak için negatif basınç ve buharla sıyırma gibi yeni teknikler geliştirilmiştir. Alkali ajan kullanılmadan yenilikçi NH_3 sıyırma teknolojilerinin geliştirilmesi, negatif basınçta buharla ayırma ve kütle transferi için yeni reaktör tasarımlarının geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Anaerobik Parçalanma, Termokimyasal Prosesler Ve Diğer Biyokimyasal Proseslerin Entegrasyonu

Biyokütleden sıvı ve gaz enerji kaynaklarının elde edilmesinde proses verimliliğini etkileyen bir diğer faktör biyoreaktör teknolojisidir. Bağlı büyümeli biyoreaktör sistemleri yüksek mikroorganizma tutma kapasitesi ile düşük alıkonma sürelerinde işletim olanağı sağladığı için tercih edilmektedir. Bu amaçla, dolgulu kolon, akışkan yataklı ve genişletilmiş yatak vb biyoreaktör sistemleri kullanılmıştır. Bağlı büyüme sistemlerinde mikroorganizma destek taneciği seçimi, reaktörde katı-sıvı teması, reaktör içi kanallaşma, biyokütle tutma kapasitesi, ve gaz-sıvı ayrımı açısından önem taşımaktadır. Gözenekli mikroorganizma destek taneciği tercih edilirken, taneciğin dayanıklılığı da diğer bir unsurdur. Tıkanma ve reaktör içi kanallaşma bağlı büyüme sistemlerinde gözlenen işletme problemlerdir. Bu tür reaktörler sıvı besleme yapılmaya uygundur, atık biyokütlenin doğrudan reaktöre beslenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, bağlı büyümeli sistemler öncesinde biyokütlenin fiziksel veya kimyasal yöntemlerle hidrolize edilerek fermente edilebilir şeker içeriğinin sıvı faza geçirilmesi ve biyokütle

taneciklerinin ayrılması gereklidir. Katı faz fermentasyonu, eş zamanlı sakkarifikasyon ve fermentasyon ya da ekstraktif fermentasyon katı biyokütlenin doğrudan fermentasyonu için kullanılan diğer biyoproses yaklaşımlarıdır. Hidroliz ve fermentasyonun eş zamanlı olması sebebiyle, reaksiyon hızı yavaşlamakta ve ürün oluşum süresi (alınma) uzamaktadır. Bu tür biyoreaktörlerde karışım, homojenite, ürün ayırma teknolojileri ile ölçeklendirme araştırmaya açık alanlardır.

Teknolojide yaşanan darboğazlar:

Biyoyakıt üretim teknolojisinde kısıtlayıcı faktör reaksiyon hızının çeşitli inhibitörler nedeniyle istenen seviyelerde olmamasıdır. Bu nedenle temel araştırma alanı reaksiyon hızını düşürücü bu inhibitörleri ortadan kaldırmak için proses, metod ya da fermentasyon teknolojisi geliştirmektir.

Atıklardan enerji eldesinde proses maliyetini arttıran ve işletimini zorlaştıran basamak fiziksel ve kimyasal ön işlemdir. Asidik ya da alkali kimyasal ön işlemler sonucunda oluşan toksik ürünler fermentasyon hızını ve verimini olumsuz etkilemektedir. Mikroalga, ultrasonikasyon, buharla patlatma vb. ön işlemler ise enerji ihtiyacı yüksek olan yöntemlerdir. Bu nedenle ön işlemsiz ya da basit ön işlemlerli fermentasyon teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla, eş zamanlı biyolojik hidroliz ve fermentasyon teknolojilerinin geliştirilmesi gereklidir.

Atıkların enerjiye biyodönüşümünde birinci basamak olan ön işlemlerde kullanılan kimyasal ve fiziksel ya da enzimatik yöntemlerin yerine, sellüloz-hemisellüloz ve ligninin eş zamanlı ayrımını sağlayacak, toksik madde oluşturmayacak ve ılımlı çevresel şartlarda kullanılabilecek yöntemler geliştirilmelidir.

Biyohidrojen ve biyobütanol üretim verimini ve hızını arttırmak üzere metabolik yollarının iyileştirilmesi ve inhibisyonların ortadan kaldırılması için genetik modifikasyon ve enzim aktivitesini arttırıcı yöntemlerin geliştirilmesi yönünde temel araştırma çalışmalarının yapılması önemlidir. Biyobütanolün eş zamanlı olarak ayrımını sağlayacak seçici ayırma yöntemlerinin geliştirilmesi ile ürün inhibisyonunun engellenmesi de bir diğer kritik araştırma konusudur.

Teknolojik gelişmeye açık diğer alanlar:

- Sürekli işletilen, enerji verimli ve ölçeklendirilebilir tek basamak hidroliz ve fermentasyon biyoproses teknolojilerinin geliştirilmesi.
- Yüksek verimli, biyoyakıt üretimi için özgün bağlı ve süspanse biyoreaktör tasarımı ve ölçeklendirme
- Eş zamanlı fermentasyon ve ürün ayırma teknolojilerinin geliştirilmesi,
- Biyohitan (hidrojen ve metan) üretiminde bioreaktör ve işletim şartlarının geliştirilmesi.

- Mikro ve makro alglerin hidrolizi, tek basamak fermantasyonla ürüne dönüşümüne ve ayrıca alglerden çoklu (biyodizel ve biyoetanol/ biyobutanol/ biyohidrojen) ürünlerin elde edilmesine yönelik proseslerin geliştirilmesi.
- Biyokütle ve biyoatıktan biyogaz üretiminin artırılabilmesi ve biyogaz üretiminin zengileştirebilmesi için anaerobik parçalanma proseslerinin optimizasyonu, ön işlem (mekanik, termal, kimyasal ve biyolojik) teknolojilerinin geliştirilmesi, proses izleme ve kontrol uygulamaları ile yazılımlarının geliştirilmesi
- Anaerobik parçalanma prosesinden sorumlu türler arası elektron transferini artırarak atıktan metan üretiminin zenginleştirilebilmesi için kimyasal ve biyolojik katkı maddeleri eklemenin etkilerinin araştırılması, tespit edilmesi ve katkı maddelerinin geliştirilmesi
- Avrupa Yeşil Mutabakatı 2030 yılına kadar sera gazlarının azaltılmasına odaklanmıştır ve bu gaz sektörünün karbondan arındırılmasına ve biyometan üretiminin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasına kayacaktır. Bu kapsamda biyogaz'dan biyometan saflaştırma sistem ve teknolojilerinin yaygınlaştırılması
- Biyometanın enerji güvenliği için doğal gaz hattına besleme alternatifi ile araç yakıtı olarak kullanımının geliştirilmesi
- Tarımsal ve hayvansal atıklar ve çeşitli kentsel organik atıklar ile ilgili olarak çok çeşitli biyokütle potansiyelini işleyebilen sağlam ve esnek lojistik sistemler (toplama, taşıma, depolama) kurulmalıdır.
- CHP ünitesinden çıkan ısının bölgesel konut alanlarında kullanımının önündeki yasal engellerin kaldırılması ve kullanımın geliştirilmesi,
- Termal verimliliğin artırılması ve emisyon azaltılması alanlarında teknoloji geliştirilmesi
- Biyogazın saflaştırılması sonrasında kalan CO₂'in hidrojenasyonu ile metanol, yüksek alkoller, formik asit, olefinlere dönüştürülmesi, biyokütle kültürü yapılması, gıda maddesi üretimi, kuru buz üretimi konuları yeni gelişmekte olan rotalardır. Ayrıca, metanasyon ve reforming ile biyometan ve sentez gazı üreterek sentez gazından hidrojen, methanol ve Fischer Tropsch sıvı yakıtlarına geçiş konusundaki çalışmalar laboratuvar ve pilot ölçektedir. Bu konularda çalışmaların yapılması önemli olacaktır.
- Biyogaz tesisleri için ek gelir kaynaklarının (sıvı digestatın / besinlerin / biyomoleküllerin ticarileştirilmesi, CO₂ değerlendirilmesi) geliştirilmesi
- Digestat yönetimi ve iyi tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı **termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri** ile **biyoyakıt** ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik **atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm** teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik **seçici heterojen katalizörlerin** geliştirilmesi

Biyokütle ve organik atıklar Gazlaştırma ve Piroliz uygulamalarında dünyada THS: 6-9, Türkiye’de THS: 6-9 seviyesindedir. Endüstriyel ölçekli biyokütle gazlaştırma tesisleri mevcuttur.

Sentez gazından yakıt ve değerli kimyasal üretiminde üretilmek istenen ürüne bağlı olarak dünyada THS: 4-9, Türkiye’de THS: 4-7 seviyesindedir. 9 seviyesinde üretim yapan birkaç tane tesis mevcuttur.

(Hidrotermal) Karbonizasyon için dünyada THS:4-6, Türkiye’de THS: 2-3 seviyesindedir.

Termokimyasal proseslere dayanan yalnızca sınırlı sayıda ticari biyorafineri bulunmaktadır. Biyokimyasal prosesler ile ilgili olarak fermantasyon teknolojilerine ve kimyasal proseslerle ilgili olarak katalitik ve esterleşme teknolojilerine dayalı biyorafineriler daha yaygındır.

Hedef ürüne bağlı olmakla beraber ticari olarak kullanılan FT katalizörleri, metanol katalizörleri mevcuttur.

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılacak platform kimyasalların üretilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

AB’de ve 10 AB üyesi olmayan ülkede ticari veya demonstrasyon ölçeğinde 400’den fazla kimyasal ve malzeme odaklı biyo-rafineri bulunmaktadır. Bunların yaklaşık 300’ü AB’de konumlanmaktadır(<http://data.europa.eu/89h/24e98d11-ef06-4233-8f69-1e123938e891>).

Kimyasal ve malzeme odaklı biyorafinerilerin %56’sını, (1) şekerli ve nişastalı bitkilerden tek platformlu (C6 şeker veya nişasta üreten) biyo-rafineriler ve (2) yağlı bitkiler, atıklar ve artıklardan tek platformlu (biyoyağ üreten) biyo-rafineriler oluşturmaktadır. Hammadde olarak odundan iki platformlu (küspe ve kullanılmış likör) biyo-rafineriler ise toplam tesis sayısının %20’sini oluşturmaktadır. Lignoselülozik kaynaklardan C5 ve C6 şekerleri ile lignin üretimi, mikroalglerden biyoyağ ve biyogaz üretimi, biyokütleden ve doğal elyaftan organik elyaf ve biyoyağ üretimi ve lignoselülozik atıklardan piroliz sıvısı ve biyoçar üretimi ve lignoselülozik biyokütleden ve belediye katı atıklarından sentez gazı üretimi üzerine tesisler ise kalan kısmı oluşturmaktadır.

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktıların (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Biyogaz ve Biyometan: Dünyada biyogaz ve biyometan üretimi gerçek ölçekte uygulanmaktadır ve THS: 6-9 seviyesindedir. Türkiye’de biyogaz üretimi için THS: 6-9 Biyometan üretimi için THS :4-6 seviyesindedir.

Biyometanol: Dünyada biyometanol üretimi endüstrilemiştir. Türkiye’de biyometanol üretimine yönelik Konya Şeker Fabrikasında proses uygulaması olduğu belirtilmektedir. Dünya’da THS: 9, Türkiye’de THS:9 olarak değerlendirilmektedir.

Biyobütanol: Dünyada ve Türkiye’de biyobütanol üretimi için ise teknoloji seviyesi temel araştırma ve laboratuvar ölçeğindedir. Dünyada ve Türkiye’de THS: 3-4 olarak değerlendirilmektedir.

Biyohidrojen: Dünyada ve Türkiye’de biyohidrojen üretimi ile ilgili temel araştırma projeleri yürütülmektedir, ancak ticarileşmiş bir uygulaması yoktur. Dünyada ve Türkiye’de THS: 3-5 olarak değerlendirilmektedir.

Biyohitan (biyometan+biyohidrojen): Dünya’da THS: 6-9 seviyesindedir. Türkiye’de Sanayi-Üniversite (TÜBİTAK 1501) projeleri ile laboratuvar ölçeğinden pilot ölçeğe geçiş başlamıştır. Biyohidrojen üretimi için en uygun yaklaşım merkezi olmayan üretim proseslerinin (de-centralized) geliştirilmesidir. Üretim verimini arttırmaya yönelik yenilikçi biyoreaktör tasarımları, laboratuvar ölçeklerinin gerçek ölçeğe taşınması için ölçeklendirme, modelleme çalışmalarının geliştirilmesi gereklidir. Türkiye’de THS:4-6 olarak değerlendirilmektedir.

Biyometan ve biyometanol Avrupa, Aysa ve Amerika’da gerçek ölçekte üretilmektedir ve ticarileşmiştir. Biyobütanol üretimi için ise teknoloji seviyesi temel araştırma ve laboratuvar ölçeğindedir.

Türkiye’de biyogaz üretimi gerçek ölçekte uygulanmaktadır. Biyogazın saflaştırıldığı ve biyometan üretimi yapan bir tesis bulunmamaktadır. Küçük ölçekte demonstrasyon temelli olarak Fritolay Firması Manisa fabrikasında bir yatırım yapmaktadır.

Biyohidrojen üretimi ile ilgili temel araştırma projeleri yürütülmektedir. Biyohitan üretiminde Sanayi-Üniversite (TÜBİTAK 1501) projeleri ile laboratuvar ölçeğinden pilot ölçeğe geçiş başlamıştır. Biyohidrojen üretimi için en uygun yaklaşım merkezi olmayan üretim proseslerinin (de-centralized) geliştirilmesidir. Üretim verimini arttırmaya yönelik yenilikçi biyoreaktör tasarımları, laboratuvar ölçeklerinin gerçek ölçeğe taşınması için ölçeklendirme, modelleme çalışmalarının geliştirilmesi gereklidir.

Gaz ve sıvı yakıt üretiminde eş zamanlı üretim ve hidrojen ayırma/ saflaştırma teknolojilerinin geliştirmesi gereklidir.

Digestate ürünlerinde son yılların genel Ar-Ge konusu besinlerin geri kazanılması ve gübre üretiminde kullanımı üzerine gerçekleşmektedir. Digestattan gübre ve toprak iyileştirici vb ürünlerin eldesinde dünyada ve Türkiye’de THS: 6-9 seviyesindedir. Digestattan N-P ve diğer ürünlerin kazanımında dünyada ve Türkiye’de THS: 3-4 seviyesindedir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri ile biyoyakıt ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik seçici heterojen katalizörlerin geliştirilmesi

Dünyadaki somut örnekler

Hidrotermal sıvılaştırmaya dayalı biyorafineri uygulamaları^{5,6}:

Hidrotermal sıvılaştırma (HTL) daha çok laboratuvar ölçeğinde çalışılmaktadır. Birkaç adet sürekli modda çalışan pilot tesis de inşa edilmiştir. Örneğin Pasifik Kuzeybatı Ulusal Laboratuvarlarında (PNNL) inşa edilen pilot tesiste farklı biyokütle türleri (algler ve tarımsal artıklar gibi) hidrotermal sıvılaştırma ile işlenmektedir. HTL gelişmekte olan bir teknoloji olarak görülmektedir. Örneğin Genifuel şirketi, PNNL tarafından geliştirilen teknolojinin ticari kullanım potansiyelini araştırmaktadır. Licella Pty, Cat-HTR™ (Katalitik Hidrotermal Reaktör) prosesinde, temel olarak tarımsal ve endüstriyel artıklar ve atıklar hammadde olarak değerlendirilmektedir. Steeper Energy, Danimarka'daki Aalborg Üniversitesi ile işbirliği içinde Hydrofaction™ prosesini geliştirmektedir. Silva Green Fuels tarafından Norveç'te HTL teknolojisine dayalı bir demonstrasyon tesisi inşa edilmiştir. HTL ile üretilen ham biyo-ürün, yakıt olarak değerlendirilebilmekte veya alternatif yakıt veya kimyasal üretmek için hidroişlem ile yükseltilmektedir (upgrade). HTL ham ürünü için bir diğer seçenek de ham ürünün mevcut petrol rafinerilerinde birlikte işlenmesidir (hidroişlem ve ardından FCC). Bazı pilot ve demonstrasyon ölçeğinde örnekler aşağıda verilmektedir:

Kalkar/Niederrhein Industrially: 10 ton/gün biyokütle kapasitesine (%20-30 kuru madde içeriği) sahip hidrotermal karbonizasyon sistemi 25 bar basınçta ve 230 °C sıcaklıkta çalışmaktadır.

AVA-CO2 AG (HTCyle), Karlsruhe and Relzow/Anklam: HTC tesisi yılda 8000 ton biyokütleli katı ürüne dönüştürmektedir. Sistem 210 °C sıcaklıkta ve 24 bar basınçta çalışmaktadır.

Terranova Energy GmbH: HTC pilot tesisi %15-30 kuru madde içeriğine sahip ve 30000 kişinin yaşadığı bir bölgeden alınan arıtma çamurunu işlemektedir.

Artec Biotechnology GmbH: HTC demo tesisi bir araştırma projesinin parçası olup, sistem 200-220 °C sıcaklıkta 5 saat kalma zamanı ile çalışmaktadır. Kullanılan biyokütlenin nem içeriği %50'dir. 2500 ton biyokütleden 1100 ton katı ürün elde edilmesi planlanmaktadır.

Sentez gazı biyorafineri uygulamaları-sentetik yakıt ve kimyasal üretimi^{5,6:}

Dünya genelinde sentez gazından biyoyakıt üretilen tesisler Tablo 2.4 'de verilmektedir.

Tablo 2.4. Dünya Genelinde Sentez Gazından Biyoyakıt Üretilen Tesisler

Şirket/Enstitü/Üniversite Adı	Başlangıç Yılı	TRL-Ölçeği	Besleme	Çıkış (Stream Akış)	Teknoloji	Ülke
Cutec	1990	TRL 4-5 pilot	saman, ahşap, kurutulmuş silaj, organik kalıntılar	FT sıvıları (0,02 t/yıl)	Atmosferik gazlaştırıcı	Almanya
Lahti Energia Oy	1998	TRL 9 ticari	odun atığı	yenilenebilir dizel (HVO)(70 MWth)	Dolaşimli Akışkan Yatak gazlaştırıcı	Finlandiya
CHP Agnion Biomasse Heizkraftwerk Pfaffenhofen *	2001	TRL 4-5 pilot	odun atığı (80000t/yıl)	SNG (32,5 MWth)	Agnion Heatpipe-Reformer	Almanya
Enerkem	2003	TRL 4-5 pilot	odun talaşı, işlenmiş ahşap, çamur, belediye katı atığı, petrol koku, harcanmış plastikler ve buğday samanı	SNG, etanol (375 t/yıl), metanol (475 m ³ /yıl)	N.A	Kanada
CHOREN Industries GmbH	2003	TRL 4-5 pilot	geri dönüştürülmüş ve kalıntı ormanlık odunlardan gelen kuru odun talaşı	FT sıvıları (53 t/yıl)	N.A.	Almanya
Vienna University of Technology/BIOENERGY 2020+	2005	TRL 4-5 pilot	FICFB gazlaştırıcıdan gelen syngas (5 m ³ /sa)	FT sıvıları (5 kg/gün)	N.A.	Avusturya
Southern Research Institute **	2007	TRL 4-5 pilot	selülozik, belediye atıkları, syngas (4 t/gün)	FT sıvıları (0,002 t/yıl), karışmış alkoller	N.A.	Amerika
West Biofuels	2007	TRL 6-7 demo	temiz odun, atık odun (5 t/gün)	FT sıvıları	İkili akışkan yatak termal reforming	Amerika
Bio SNG Guessin	2008	TRL 6-7 demo	gazlaştırıcıdan gelen syngas (350 m ³ /yıl)	SNG (576 t/yıl)	N.A.	Avusturya
Enerkem	2009	TRL 6-7 demo	işlenmiş odun (örneğin; devredışı kalmış elektrik direkleri ve demiryolu bağları), odun atığı ve MSW (48 t/gün)	etanol (4000 t/yıl), metanol (1000 t/yıl)	N.A	Kanada
BioMCN	2009	TRL 8 türünün ilk örneği ticari demo	ham gliserin, diğer	metanol (200000 t/yıl)	N.A.	Hollanda

Kaynak: A. Molino, V. Larocca, S. Chianese ve D. Musmarra, 2018. Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review, Energies, 2018, 11, 811.

ENERKEM: Edmonton'da (Kanada) belediye katı atıklarından ticari olarak biyoyakıt ve kimyasalları üreten ilk şirkettir. İspanya ve Hollanda'da atıktan metanol üretimi üzerine iki proje daha gerçekleştirmektedir. Ticari proseslerinde atık hazırlama, gazlaştırma, sentez gazı

temizleme ve şartlandırma ve metanol ve etanol üretimi için katalitik dönüşüm gerçekleştirilmektedir.

Karlsruhe Institute of Technology: Bioliq® pilot tesisinde biyokütle (buğday samanı), biyokütlenin toplandığı kırsal bölgelerde hızlı piroliz ile sıvılaştırılmaktadır. Piroliz ile elde edilen hidrokarbon bulamaç, merkezi bir konumda bulunan sürüklemeli akış gazlaştırıcı ile sentez gazı üretmek üzere gazlaştırılmaktadır. Sentez gazı temizlenmekte ve şartlandırılmakta, ardından metanol veya dimetil eter sentezi gerçekleştirilmektedir. DME ayrıca biyoyakıtlara dönüştürülmektedir.

LanzaTech: Atıktan elde edilen sentez gazı doğada mevcut olan bakteriler kullanılarak fermente edilmekte ve etanol üretilmektedir. Bu teknolojinin gösterimi Çin, Japonya, Amerika Birleşik Devletleri ve Yeni Zelanda'da yapılmıştır.

Piroliz yağı biyorafineri uygulamaları^{5,6}

Empryro, Twence (Hollanda): Hengelo'da piroliz teknolojisini kullanan ticari bir tesistir. Tesis piroliz yağı üretmek için girdi olarak talaş kullanmaktadır. Piroliz yağı haricinde tesiste ısı ve elektrik de üretilmektedir. Piroliz yağı, süt ürünleri şirketi Friesland Campina için proses buharı üreten doğal gazla birlikte yakılmaktadır.

BTG (Hollanda): Pilot tesis ölçeğinde hammadde olarak piroliz yağı kullanılarak farklı yeni ürünler araştırılmaktadır. Örneğin;

- Fenol-formaldehit reçinelerinde fosil fenol yerine pirolitik lignin
- Asfaltta fosil bitümün yerine pirolitik lignin
- Organik asitlerin geri kazanımı
- Monofenoliklerin üretimi
- Biyoetanol, levülinik asit ve polioller gibi platform kimyasalları ve yakıtlar için yenilenebilir hammadde olarak pirolitik şekerler

Liekxa, Green Fuel Nordic Oy (Finlandiya): Prefabrik tesislerin Hollanda'da inşa edilmesi ve daha sonra kereste fabrikasının yanında yer alacak olan Liekska piroliz tesisine monte edilmesi planlanmaktadır. Tesis, hammadde olarak değirmenden çıkan talaşı kullanmak üzere tasarlanmıştır. Tesiste ana ürünler piroliz yağı, ısı ve elektrik üretimidir.

CHIMAR Hellas (Yunanistan): Fenol-formaldehit reçinesinin formülasyonunda ihtiyaç duyulan fenolün bir kısmını ikame etmek için fenolik bileşikler içeren piroliz yağının değerlendirilmesi

Türkiye'de başarılı örnek ve girişimler

Sentez gazı biyorafineri uygulamaları-sentetik yakıt ve kimyasal üretimi:

Türkiye’de büyük ölçek Pilot ve demo ölçekte biyokütleni gazlaştırılması ve elde edilen sentez gazından sıvı yakıt üretilmesi konusunda TÜBİTAK MAM Enerji Enstisü tarafından çeşitli projeler tamamlanmıştır. Bu kapsamda kurulan pilot tesislerin özellikleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. Türkiye’de pilot ölçekli biyokütle gazlaştırma ve sıvı yakıt üretim tesisleri

Şirket/Enstitü/Üniversite Adı	Başlangıç Yılı	TRL-Ölçeği	Besleme	Çıkış (Stream Akışı)	Teknoloji	Ülke
TUBİTAK MRC—ENERGY INSTITUTE—TURKEY	2009	TRL 4–5 pilot	biyokütle	SNG (0,2 MW)	Aşağı akışlı sabit yatak gazlaştırıcı	Türkiye
TUBİTAK	2013	TRL 4–5 pilot	fındık kabuğu, zeytin keki, odun talaşı ve linyit karışımları kombinasyonu (0,2 t/sa)	FT sıvıları (250 t/yıl)	Basıncılı akışkan yatak gazlaştırıcı	Türkiye

Kaynak: A. Molino, V. Larocca, S. Chianese ve D. Musmarra, 2018. Biofuels Production by Biomass Gasification: A Review, *Energies*, 2018, 11, 811

TRIJEN (Türkiye): TÜBİTAK destekli TARAL 1007 Projesi kapsamında müşteri kurum Türkiye Kömür İşletmeleri’nin Soma (Manisa) Yerleşkesinde bir pilot tesis kurulmuştur. Tesiste Soma Bölgesinden temin edilen linyitler akışkan yatak gazlaştırma tesisinde sentez gazına dönüştürülmüştür. Elde edilen ham sentez gazı bir dizi gaz temizleme, şartlandırma ve ayırma işleminden geçirilerek Fischer-Tropsch teknolojisi ile ham sıvı hidrokarbon ürünler elde edilmiştir. Fischer-Tropsch reaksiyonu için ihtiyaç duyulan katalizör de TÜBİTAK MAM tarafından geliştirilmiş ve Ege Kimya’nın katkılarıyla üretilerek pilot ölçekte performansı belirlenmiştir. Tesiste biyokütlenin kömür ile karışım halinde gazlaştırılması da mümkündür.

Piroliz yağı biyorafineri uygulamaları

Enoven: 2005 yılında kurulmuş olan firma, atıktan enerji eldesi üzerine konsantre olmuş ve ülkemiz teknoloji envanterine yerli piroliz teknolojisi kazandırmıştır. Gerek pilot, gerekse prototip üzerine yapılan çalışmalar sonunda, Ar-Ge faaliyetlerini tamamlayarak 2010 yılında ülkemizde ilk defa kurulan ve lisans alan ÖTL (Ömrünü Tamamlamış Lastik) piroliz tesisine mühendislik hizmetleri sağlamıştır. Söz konusu tesis Aksaray OSB’de bulunup, kesikli reaktör (doldur boşalt) esasına göre çalışmaktadır. 2014 yılında da Sivas OSB’de yine Türkiye’de ilk sürekli piroliz sisteminin tüm mühendislik çalışmalarını ve üretimlerini kendi bünyesinde yapıp kurulumunu tamamlamış, yatırımcıya teslim etmiştir. 2016 yılında kendi iştiraki olarak kağıt hamuru atıklarından sıvı yakıt üretilip bu yakıttan enerji üreten bir işletmeyi hayata geçirmiştir. Gerede OSB’de kurulmuş olan işletme, devamlı piroliz sistemi ve bu sistemin atık ısı ile

çalışan kurutma fırınından oluşmaktadır. Lisansız olarak 1 MW/h elektrik üreten işletme gerek teknolojsi gerekse hammaddesi itibariyle ilk olma özelliğini taşımaktadır.

SEM Biyokütle: SEM biyokütle, Manisa ilinin, Akhisar ilçesinde piroliz tesisi inşa edilmesi ve faaliyete alınması için kurulmuştur. SEM biyokütle, 1 MWe kapasitesinde piroliz tesisi kurulması amacıyla TurSEFF finansmanından yararlanmak için başvuruda bulunmuştur. Projedeki santral ham kaynak olarak Manisa bölgesinde bol miktarda bulunan tavuk çiftliklerinden alacağı hayvan gübresini kullanmayı amaçlamaktadır. Proje sonucunda, tesis yılda 6,4 GWh elektrik üretecektir. Ayrıca bu tesis sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir katkıda bulunacaktır ve üretilen ısının biyolojik anaerobik sindirim sürecinde tekrar kullanılmasını sağlayacaktır. Buna ek olarak, tesis yılda 36 bin ton tavuk gübresinin doğaya kontrolsüz olarak salınımını engelleyerek toprak ve su kirliliği gibi sorunlar ortaya çıkmasına engel olacaktır.

Emrebay Enerji: Tesiste; kullanılmış, ömrünü tamamlamış lastikler piroliz yöntemi ile maddesel olarak ayrıştırılarak, karbon siyahı, piroliz yağı, çelik tel ve elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca tesiste atık lastik dışında kauçuk kullanımı da gerçekleştirilmektedir. Tesiste yılda 10.000 ton ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL) kullanılacaktır.

ERA Çevre Teknolojileri: ERA Çevre Teknolojileri, Erzincan'da kurduğu tesisinde Ömrünü Tamamlamış Lastik (ÖTL) geri dönüşümü gerçekleştirmektedir. ÖTL geri dönüşümü, ömrünü tamamlamış araç lastiklerinin piroliz yöntemi ile bileşenlerine ayrılarak yeniden kullanılabilir hammaddeler haline getirilmesi işlemidir. ÖTL geri dönüşümü; gerek çevrenin korunması, gerekse de değerli hammaddelerin geri kazanımı açısından büyük önem taşımaktadır. ÖTL geri kazanımı sonucu oluşan ürünler hammadde veya yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılır. ERA Çevre Teknolojileri, patentli 'Sürekli Akış Piroliz' işlemiyle atık lastiklerden yağ, gaz ve karbon siyahı üretir. Üretilen pirolitik yağ ile de dizel motorlarda elektrik üretilmektedir. Erzincan'daki bu tesis dünyada ömrünü tamamlamış lastikleri hammadde olarak kullanan ilk elektrik santralidir. (Kurulu Güç 12 MW). Piroliz işlemi sonucu üretilen karbon siyahı da pek çok farklı sektörde kullanımı olan aynı zamanda Türkiye'nin de dünyanın 5. büyük ithalatçısı olduğu değerli bir üründür. ERA Çevre Teknolojileri, bu ürünü 'Green Carbon Black'™ markasıyla piyasada çeşitli sektörlerde satışını gerçekleştirmektedir.

Karabük Belediyesi: Karabük Belediyesi, Karabük Üniversitesi ve Karabük Ticaret Odasından oluşan ortak çalışma grubu ile yürütülen "Plastik Atıkların Piroliz Yöntemi ile Bertaraf Edilmesi ve Geri Kazanımı" adlı proje ile bölge dışından temin edilen ve geri dönüşümü olmayan plastik atıklar gaz, yağ ve karbon siyahı elde edilmektedir. Elde edilen pirolitik gaz sistemde tekrar yakılmakta ve oluşan pirolitik yağ distilasyon işlemi sonrasında kullanıma hazır hale gelmektedir. Elde edilen yağ Karabük Belediyesi bünyesinde jeneratörlerde kullanılmaya

başlanmış olup proje ile kurulan laboratuvarında kullanım alanları ve farklı ürünler üretilmesi konusunda teknik çalışmalar devam etmektedir.

Üniversitelerdeki Termokimyasal Dönüşüm Teknolojileri Çalışmalarından Örnekler

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara Üniversitesi, Çukurova Üniversitesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Ege Üniversitesi, Fırat Üniversitesi, Dicle Üniversitesi, Sakarya Üniversitesi, Yalova Üniversitesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Batman Üniversitesi, Akdeniz Üniversitesi gibi pek çok üniversitelerde ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde termokimyasal dönüşüm teknolojileri üzerine çalışılmaktadır.

Ankara Üniversitesi'nde Prof. Dr. Ali Sınağ tarafından 2007-2010 yılları arasında yapılan "Çeşitli biyokütlelerin piroliz ve hidrotermal işlemlerle değerli kimyasallara dönüşümünün incelenmesi" konulu TÜBİTAK 1001 projesinde; odun talaşı, selüloz, bebek maması ve mısır model biyokütle olarak kullanılmış olup, seçilen biyokütlelerin hidrotermal karbonizasyonu ve pirolizi sonucunda oluşacak değerli kimyasallar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Balıkesir Üniversitesi'nde pirinç kabuğundan HTC yöntemi ile karbon küre üretimi üzerine çalışılmıştır. Gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar sonucunda, lignoselülozik bir biyokütle olan pirinç kabuğundan hidrotermal karbonizasyon yöntemi ile elde edilen karbon mikro/nano kürelerin hem hidrojen depolama materyali olarak enerji alanında, hem de ilaç adsorbent materyali olarak ilaç salım çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ege Üniversitesi'nde Prof. Dr. Jale Yanık ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı "Sürdürülebilir Kaynak Olarak Biyokömür" başlıklı 114M001 nolu TÜBİTAK projesidir. Biyokütle olarak, lignoselülozik bazlı (ayçiçek sapı ve cibre), hayvansal bazlı (tavuk gübresi) ve algal bazlı (deniz yosunu) seçilerek bu biyokütlelerden torrefikasyon yöntemi ile biyokömür ve hidrotermal karbonizasyon ile hidrokömür elde edilerek bunların yakıt ve toprak iyileştirici özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda hidrokömür ve biyokütlelerin verim ve özelliklerini etkileyen en önemli parametrenin sıcaklık olduğunu bulmuşlardır.

İstanbul Teknik Üniversitesi Sentetik Yakıtlar ve Kimyasallar Teknoloji Merkezi'nde (SENTEK), pilot ölçek gazlaştırma ve piroliz ünitelerinde tarımsal atık, atık su arıtma çamuru, kompozit atıklar vb. pek çok biyokütle ve atık'ın termokimyasal dönüşüm davranışları endüstriyel koşullara yakın işletme ortamında incelenmektedir. Yüksek sıcaklık pirolizi ve gazlaştırma ile hidrojen ve metan üretimine yönelik prosesler geliştirilmektedir. Sentez gazı dönüşüm teknolojileri üzerine de oldukça kapsamlı bir heterojen katalizör test alt yapısı mevcuttur. Bu altyapıda sentez gazından olefin üretimine yönelik yeni nesil katalizör geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılacak platform kimyasalların üretilmesi

Braskem (Brezilya): Şeker kamışından üretilen etanol kimyasal olarak etilene dönüştürülmektedir. Etilen daha sonra polietilen üretmek için polimerizasyon ünitesine iletilmektedir.

India Glycol (Hindistan): Tesiste, şeker kamışından elde edilen etanolden birkaç kimyasal dönüşüm adımıyla etilen glikoller (monoetilen glikol, dietilen glikol ve trietilen glikol) üretilmektedir. Monoetilen glikol (MEG), polyester elyaf, iplik, film ve PET reçine endüstrilerinde kullanılmaktadır. MEG, polietilen tereftalat (PET) üretmek için tereftalik asit ile kopolimerize edilmektedir. Coca Cola ve Danone, kısmen biyo bazlı PET'i şişeleme ürünleri için kullanmaktadır.

Cosun (Hollanda): Şeker pancarından şeker üretiminde yan akım şeker pancarı küspesinin değerini artırmak için değerli ürünleri izole etmek üzere çoklu ekstraksiyon teknikleri geliştirilmiştir. Tesiste mikroselüloz lifler, arabinoz ve galakturonik asit yüksek değerli ürün olarak izole edilebilmektedir.

Covestro: Yeni geliştirilen bu proseste, önce endüstriyel şekeri bir öncü bileşiğe dönüştürmek için bir mikroorganizmayı katalizör olarak kullanmaktadır. Peşi sıra ikinci bir adımda kimyasal kataliz yoluyla anilin üretilmektedir. Prosesin yapılabirliği ilkesel olarak kanıtlanmış olup, ölçek büyütme aşamasına geçilmesi planlanmaktadır.

Corbion & Total-Corbion PLA, Tayland: Şeker kamışından elde edilen C6 şekerleri, Corbion tarafından laktik asit üretmek üzere fermente edilmektedir. Laktik asit, Total Corbion PLA tarafından laktit monomerlerine ve polilaktik aside dönüştürülmektedir.

Croda: Biyo-bazlı polimerler, yağlayıcılar, kaplamalar ve kişisel bakım ürünleri için oleokimyasal biyorafinasyon yoluyla kimyasal ara ürünlerin üretimi ticari olarak gerçekleştirilmektedir.

Matrica Biorefinery (İtalya): Akdeniz iklimine uygun ve terk edilmiş arazide yetişen devedikeni gibi düşük girdili birden fazla hammadde kullanarak kimyasallar üretmek için kimyasal ve biyokimyasal proseslerin entegrasyonu

Lenzing (Austria): Odun, sülfite hamurlaştırma yoluyla çözünen odun hamuru haline getirilmekte ve tekstil, dokunmamış kumaş ve endüstriyel uygulamalar için çeşitli markalar altında pazarlanmaktadır. Buhar kondensat ekstraksiyon prosesi ile asetik asit ve furfural kullanılmış

likörden ayrılmaktadır. DuPont / Danisco şirketi ile işbirliği içinde, tatlandırıcı olarak kullanılmak üzere ksiloz, kullanılmış sülfite liköründen ekstrakte edilmektedir. Kalıntı siyah likör ise enerji üretimi için yakılmaktadır.

Borregaard (Norveç): Odunun farklı bileşenlerini kullanarak Borregaard, tarım ve balıkçılık, inşaat, ilaç ve kozmetik, gıda maddeleri, piller ve biyoyakıtlar gibi sektörlerde çeşitli uygulamalar için lignin ürünleri, özel selüloz, vanilin, biyoetanol ve mikrofibriler selüloz üretmektedir.

Domtar & CelluForce (ABD): Kraft kağıt hamuru fabrikalarında kağıt hamuru, çeşitli son kullanımlar için değerlendirilmektedir. Plymouth lignin ayırma tesisi, LignoBoost™ teknolojisinin ilk ticari ölçekli kurulumudur. Yan ürün olarak tall yağı ve terebentin elde edilmektedir. Ortak girişimi CelluForce ile nanokristalin selüloz üretmektedir. Ayrıca C5&C6 şekerlerin kimyasallara ve yakıtlara dönüştürülmesi üzerine de araştırmalar gerçekleştirmektedirler.

Kraton: Kraft işleminin yan ürünü olan ham tall yağı, Kraton CTO biyorafinerisinde dört farklı şekilde işlenmektedir: Tall yağı yağ asidi (TOFA), tall yağı reçinesi (TOR), damıtılmış tall yağı (DTO) ve zift. Bu fraksiyonlar, biyo-bazlı kimyasallara yükseltilebilmekte ve yüzey aktif maddeler, alkid reçineleri ve yapıştırıcılar gibi alanlarda uygulanma şansı bulmaktadır.

Fraunhofer CBP, Leuna (Almanya): Organosolv, lignin ve hemiselülozu çözmek için organik bir çözücü kullanan bir hamurlaştırma tekniğidir. Fraunhofer CBP, bu tekniği kullanarak pilot ölçekte odun çipsi işlemektedir. Odun çipsinden organosolv yöntemi ile lignin ve hemiselüloz, selülözden ayrılmaktadır. Peşi sıra lignin, hemiselülozden çöktürme yöntemi ile ayrılmaktadır. Lignin malzeme uygulamalarında değerlendirilirken, hemiselülöz ve selüloz sırasıyla C5 ve C6 şekerlerine hidrolize edilmektedir. Peşi sıra hidrolizatlarından kimyasallar üretilmektedir.

Clariant (Almanya ve Romanya): Clariant saman gibi tarımsal atıklardan sunliquid® teknolojisine dayalı selülozik etanol üretimi için türünün ilk örneği olan ticari ölçekli bir tesis kurmaktadır. Yıllık selülozik etanol kapasitesi 50.000 tondur. Proses, C5 & C6 şekerlerinin eş zamanlı olarak etanole fermantasyonunu içermektedir. Lignin ise yakılarak enerji elde edilmektedir.

Avantium (Hollanda): Biyo-bazlı kimyasal üretimi için yüksek asitlik/düşük sıcaklıkta hidroliz işlemi ile glikoz üretilmektedir. Peşi sıra biyo-monoetilen glikol (MEG) ve furan dikarboksilik asit (FDCA) üretmek için C6 şekerleri farklı yöntemlerle tepkimeye sokulmaktadır.

Green Biorefinery (Avustralya): Utzenaich'de bir demonstrasyon tesisinde biyokütleden ekstrakte edilerek elyaf türevi ürünler, laktik asit ve amino asit elde edilmektedir. Kalan organik sıvı kısım ve ekstraksiyon kalıntısından havasız ortamda çürütme ile biyogaz ve gübre elde edilmektedir. Üretilen biyogaz elektrik ve ısı üretiminde değerlendirilmektedir.

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Dünyada biyoetanol ve biyometan için teknoloji hazırlık seviyesi THS=8'dir. Biyohidrojen ve biyobutanol için THS seviyesi THS=1-4 olarak sınıflandırılabilir. Biyohitan için ise THS =5-6 olarak önerilebilir.

Biyoeanol, biyometan üretiminde dünyada birçok başarılı uygulama mevcuttur. Dünya'da biyoetanol üretimi; Amerika'da yıllık 55 milyon m³, Brezilya'da 25 milyon m³, Avrupa Birliğinde 4.8 milyon m³, Çin ve Hindistan'da 3.1 milyon m³, Canada ve Tayland'da ise 1.5 milyon m³ üretim kapasiteleri vardır.

Büyük ölçekte biyokütleden biyohidrojen ve biyobutanol üretimi henüz gelişme aşamasındadır.

Türkiye'de Konya Şeker 84 milyon litre/yıl üretim kapasiteli Biyoetanol Tesisi şeker pancarı melasından, doğrudan pancardan veya şekerden üretim yapabilecek şekilde tasarlanmıştır.

Türkiye'de, Biyohitan üretiminde GKE Enerji ve Dokuz Eylül Üniversitesi ortak TÜBİTAK 1501 Projesi yürütülmektedir. Bu projede zirai atıklardan ön işlem-biyohidrojen ve biyometan aşamalarından oluşan pilot ölçekli biyohitan üretimi yapılacaktır.

Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesine yönelik dünya genelinde proses ve teknoloji akışı aşağıda ifade edilmiştir. Ülkemizde uygulama örneği mevcut değildir. Dünyadaki başarılı girişimler ve örnek, Nature Tech&Omri (Çin)'dir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri ile biyoyakıt ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik seçici heterojen katalizörlerin geliştirilmesi

Araştırma ve mühendislik ekipleri için Ar-Ge yatırımları artırılmalı ve şirket içi bilgi birikimini tamamlayan uzmanlıklarla işbirliği ağları genişletilmelidir. Pratik uygulamaları arttırmak ve ticari ölçeğe ulaşmak için yaygınlaştırılabilecek Erken Aşama Tekno-Ekonomik Analiz ve Modelleme çalışmalarına girdi sağlayacak güvenilir bilgi veya verinin pilot ölçek sistemlerden elde edilmesi gerekmektedir. Pilot/demonstrasyon tesislerinin ortak finansmanı için yeterli miktarda kamusal destek sağlanmalıdır. Kamu-özel ortaklık projeleri için TRIJEN gibi öncü girişimlere devam edilmelidir. Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri ve işbirliği proje destekleri ile Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.

Kimya mühendisliği, makine mühendisliği, çevre mühendisliği, kimyagerler bir araya gelmelidir. Hammadde karakterizasyonu, proses tasarımı, yaşam döngüsü analizi, proses iyileştirme (upgrading) çalışmaları, simülasyon çalışmaları, katalizör geliştirme çalışmaları disiplinler arası işbirliği ile yürütülmelidir.

Enerji, petrokimya, katalizör üreticileri bir arada çalışmalıdır.

Belediyeler sahip oldukları atıkların bertarafı için fon sağlamalıdır. Bakanlıklar atıkların bertarafı ve değerlendirilmesi, katma değeri yüksek ürünleri dönüştürülmesini desteklemek amacıyla çeşitli yönetmelikler çıkarmalı, standartlar oluşturulmalı, çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmelidir. Üniversitelerde bulunan yüksek lisans, doktora öğrencileri ile çeşitli projeler yapılmalıdır. Atığa sahip olan özel sektör kuruluşları atıklarının katma değere dönüşmesi için Ar-Ge çalışmalarını desteklemelidirler.

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılabilecek platform kimyasalların üretilmesi

Araştırma ve mühendislik ekipleri için Ar-Ge yatırımları artırılmalı ve şirket içi bilgi birikimini tamamlayan uzmanlıklarla işbirliği ağları genişletilmelidir. Pratik uygulamaları arttırmak ve ticari ölçeğe ulaşmak için yaygınlaştırılabilecek Erken Aşama Tekno-Ekonomik Analiz ve Modelleme çalışmalarına girdi sağlayacak güvenilir bilgi veya verinin pilot ölçek sistemlerden elde edilmesi gerekmektedir. Pilot/demonstrasyon tesislerinin ortak finansmanı için yeterli miktarda kamusal destek sağlanmalıdır. Kamu-özel ortaklıkları ile pilot/öncü tesis uygulamaları arttırılmalıdır.

Kimya mühendisliği, makine mühendisliği, çevre mühendisliği, kimyagerler bir araya gelmelidir. Hammadde karakterizasyonu, proses tasarımı, yaşam döngüsü analizi, proses iyileştirme

(upgrading) çalışmaları, simülasyon çalışmaları, katalizör geliştirme çalışmaları disiplinler arası işbirliği ile yürütülmelidir. Büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri ve işbirliği proje destekleri ile Ar-Ge çalışmaları desteklenmelidir.

Enerji, petrokimya, katalizör üreticileri bir arada çalışmalıdır.

Belediyeler sahip oldukları atıkların bertarafı için fon sağlamalıdır. Bakanlıklar atıkların bertarafı ve değerlendirilmesi, katma değeri yüksek ürünleri dönüştürülmesini desteklemek amacıyla çeşitli yönetmelikler çıkarmalı, standartlar oluşturulmalı, çeşitli teşvik mekanizmaları geliştirmelidir. Üniversitelerde bulunan yüksek lisans, doktora öğrencileri ile çeşitli projeler yapılmalıdır. Atığa sahip olan özel sektör kuruluşları atıklarının katma değere dönüşmesi için Ar-Ge çalışmalarını desteklemelidirler.

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Çevre Mühendisliği: Organik atık kaynakları, atıkların biyodönüşümü, biyohidrojen, biyoetanol, biyometanol ve biyometan üretim mekanizmalarında, biyoproses tasarımı ve işletimi konusunda uzmanlar.

Genetik mühendisleri: Enzim üretimi ve metabolik yol izinin iyileştirilmesinde genetik modifikasyonları yapabilecek uzmanlar.

Kimya Mühendisliği: Ön işlemler ve fermantasyon teknolojilerinde uzman.

Malzeme mühendisliği: Ürün ayırma ve saflaştırma konularında membran, adsorban veya yenilikçi yaklaşımlar üretebilecek uzmanlar.

Belediyeler, enerji sektörü, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Üniversiteler, organik atık üreten gıda endüstrisi, zirai atıkların üretildiği zirai alanlardaki kooperatifler.

Üniversite; proses geliştirme, iyileştirme ve insan kaynağı yetiştirme alanında katkı sağlamalıdır.

Enerji sektörü; proseslerin pilot ya da gerçek ölçekte uygulanması alanında katkı sağlayabilir.

Belediyeler ve Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı; Avrupa Birliği Biyoenerji vizyonuna uyum çalışmalarını yürütme, veri sağlama, kaynak yaratma, istihdam, yönetmelik ve yönergeleri hazırlama alanında katkı sağlayabilir.

Gıda endüstrisi ve zirai kooperatifler: Gıda işlenmesi sırasında açığa çıkan meyve ve sebze poslarının sağlanması, zirai alanlarda çıkan organik atıkların toplanması ve organizasyonu alanında katkı sağlarken, küçük ölçekli pilot tesislerin endüstride ya da arazide uygulanmasını sağlamak.

Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübre olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesine yönelik olarak Ziraat Mühendisi, Biyolog, Kimyager, Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Uzmanları (Akademisyen), Tarımsal Biyoteknoloji Uzmanlarının ve Kimya ve Gübre sektöründen kuruluşların bir arada çalışması gerekmektedir. Üniversiteler ve Araştırma Kuruluşlarında proses dizaynı, literatür araştırılması, şahitli analizlerin ölçülmesi hakkında destek alınmalıdır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri ile biyoyakıt ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi
- Organik atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik seçici heterojen katalizörlerin geliştirilmesi

Avrupa Yeşil Mutabakatının getirdiği yükümlülüklerin, biyorafinerilerin daha büyük ölçeklerde demonstrasyonuna yönelik artan desteklerin, fosil türevli hammaddelere ve ürünlerine olan arz güvenliği kaygılarının ve bu çerçevede oluşturulan sürdürülebilirlik politikalarının, fosil türevli kimyasalların üretimi ve kullanımından kaynaklanan emisyonlara getirilen kısıtlamaların, biyobozunurluk gibi biyo-türevli ürünlerin sağladığı üstünlüklerin biyorafineri uygulamalarının yolunu açacağı değerlendirilmektedir.

Biyo-türevli kimyasalların ve malzemelerin fosil kökenli muadilleri ile ekonomik olarak hâlihazırda rekabet edememesi, büyük hacimli biyorafineri uygulamalarının önündeki en büyük ekonomik engeldir. Bu engelin aşılması için teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji ve işçilik maliyetlerinin bölgesel olarak değişkenlik göstermesi, düşük maliyetli biyokütle kaynaklarına sınırlı erişim ve ulusal vergi düzenlemeleri arasındaki farklılıklar biyorafineri uygulamalarının rekabet gücünü değiştiren unsurlardır. Biyo-rafinerilerin sertifikalı ve sürdürülebilir ham madde tedariki konusunda taleplerini karşılayacak rekabetçi bir döngüsel biyoekonomi düzenlemesi

için politikalar belirlenmeli ve zorlayıcı & destekleyici mevzuatlar oluşturulmalıdır. Biyorafinerlerin potansiyel çevresel ve diğer avantajlarını göstermek için biyokütleden ürüne tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğine ilişkin çalışmalar yapılmalıdır. Sürdürülebilir Ürün Politikası, Eko-Tasarım ve Ürün Çevresel Ayak İzi yöntemleri ile yeşil mutabakata uyum için ulusal standartlara uyum düzenlemeleri yapılmalıdır.

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Tarımsal atık ve/veya gıda niteliği olmayan ikinci nesil ve üzeri biyokütleden ara girdi olarak kullanılacak platform kimyasalların üretilmesi

Avrupa Yeşil Mutabakatının getirdiği yükümlülüklerin, biyorafinerilerin daha büyük ölçeklerde demonstrasyonuna yönelik artan desteklerin, fosil türevli hammaddelere ve ürünlerine olan arz güvenliği kaygılarının ve bu çerçevede oluşturulan sürdürülebilirlik politikalarının, fosil türevli kimyasalların üretimi ve kullanımından kaynaklanan emisyonlara getirilen kısıtlamaların, biyobozunurluk gibi biyo-türevli ürünlerin sağladığı üstünlüklerin biyorafineri uygulamalarının yolunu açacağı değerlendirilmektedir.

Biyo-türevli kimyasalların ve malzemelerin fosil kökenli muadilleri ile ekonomik olarak hâlihazırda rekabet edememesi, büyük hacimli biyorafineri uygulamalarının önündeki en büyük ekonomik engeldir. Bu engelin aşılması için teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji ve işçilik maliyetlerinin bölgesel olarak değişkenlik göstermesi, düşük maliyetli biyokütle kaynaklarına sınırlı erişim ve ulusal vergi düzenlemeleri arasındaki farklılıklar biyorafineri uygulamalarının rekabet gücünü değiştiren unsurlardır. Biyo-rafinerilerin sertifikalı ve sürdürülebilir ham madde tedariki konusunda taleplerini karşılayacak rekabetçi bir döngüsel biyoekonomi düzenlemesi için politikalar belirlenmeli ve zorlayıcı & destekleyici mevzuatlar oluşturulmalıdır. Biyorafinerlerin potansiyel çevresel ve diğer avantajlarını göstermek için biyokütleden ürüne tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirliğine ilişkin çalışmalar yapılmalıdır. Sürdürülebilir Ürün Politikası, Eko-Tasarım ve Ürün Çevresel Ayak İzi yöntemleri ile yeşil mutabakata uyum için ulusal standartlara uyum düzenlemeleri yapılmalıdır.

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen, metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Genetik mühendisleri ve proses geliştiren araştırmacıların ortak çalışması: genetiği iyileştirilmiş olan organizmaların fermantasyon teknolojilerinde uygulanması ile üretim potansiyelinin izlenmesi. Bu organizmaların yukarıda bahsedilen farklı fermantasyon yaklaşımlarında kullanılarak performanslarının değerlendirilmesi.

Kimya-Çevre ve Malzeme Mühendislerinin ortak çalışması: Yeşil kimyasallarla ön işlem proseslerinin, fermantasyon teknolojisinin ve eş zamanlı ürün ayırmada yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi.

Enerji sektörü- Üniversite ortak çalışması: Geliştirilen proseslerin pilot ölçekte uygulanması.

Kamu Kuruluşları - Sektör ve Üniversite ortak çalışması: Entegre atık yönetimi ve enerji üretiminde yönetsel süreçlerin tasarlanması ve uygulamaya alınması.

Lignoselülozik biyokütle ve biyoatıktan biyoetanol üretiminde büyük ölçekli AR-GE projeleri
Biyohidrojen/Biyohitan/ Biobutan üretimi için küçük ya da orta ölçekli AR-GE yenilik projeleri
Uygulama projelerinde çalışacak insan gününün yetiştirilmesi için kapasite geliştirme projeleri
Temel araştırma projesi, Üniversite-Sanayi ortak projeleri ve Kamu-Üniversite projeleri

Eş güdüm projeleri bu alanda beklenen araştırma çıktılarına ulaşmış olan araştırmacıların ve sektörün doğrudan uygulamaya yönelik orta ya da büyük ölçekli projelerinin desteklenmesi ile sağlanabilir. Bu amaçla, üniversite-özel sektör-kamu kuruluşu ortaklı proje önerileri alınabilir.

Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktıların (digestatın) tarımda organik gübre olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesine yönelik Ür-Ge ve Ar-Ge projelerinin geliştirilmesi, Laboratuvar çalışmaları, yurt dışı üniversite ve araştırma kuruluşları ile akademik çalışmaların koordinasyonu önem kazanmaktadır. Ayrı yürüyen projelerde katalizör görevi görecek ve dar boğazların aşılması için gerekli ürün, proses geliştirme, fayda maaliyet analizlerinin tespiti ve benchmark analizleri kapsamında yürütülmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

2.1.a. Termokimyasal dönüşüm teknolojilerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- (Hidrotermal) Karbonizasyon, piroliz, gazlaştırma, kavurma (torrefaction) gibi farklı termokimyasal sürekli (continuous) dönüşüm prosesleri ile biyoyakıt ve katma değerli ürünlerin üretilmesi; biyoyakıtların yakıt özelliklerini ve ısıl değerini artıracak katalizörlerin geliştirilmesi

- Organik atıklardan sentez gazı üretim ve dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması
- Biyokütle kullanan termokimyasal prosesler için ürün ve/veya enerji kazanım hedefine yönelik seçici heterojen katalizörlerin geliştirilmesi

Biyokütle gazlaştırması ile sentez gazı üretimi konusunda Türkiye’de yapılan önemli çalışmalar vardır. THS:5-6 seviyesinde olan bu çalışmaların THS:7-8 seviyesinde tamamlanması, sağlanacak sürekli destekler ve yeterli iş gücü ile orta vade tamamlanabilecektir.

Bu teknolojilerin mümkün olan en kısa zamanda uygulanması, biyokaynakların etkin kullanımı ve elde edilecek ürünler ile dışa bağımlılığın bir miktar azaltılması bakımından Türkiye için çok önemlidir. Ancak bahsi geçen hemen her teknolojinin yerli imkanlar ile endüstriyel olarak Türkiye’de uygulanabilir hale gelmesi ancak uzun vadede hayata geçirilebilir.

Kısa vadede 1-2 yıl, orta vadede 2-4 yıl ve uzun vadede 4-6 yıl süreli projeler

Önerilen toplam proje bütçesi: araştırma projeleri için 1-2 milyon TL/proje, pilot çalışma içeren projeler için 10-15 milyon TL/proje ve demonstrasyon projeleri için minimum 100 milyon TL/proje destekleri

2.1.b. Kimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı (esterifikasyon, hidrolizasyon, hidrojenasyon vb.) biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- **Tarımsal** atık ve/veya gıda niteliği olmayan **biyokütleden** ara girdi olarak kullanılacak **platform** kimyasalların üretilmesi

Biyokütle hidrolizi ile C5-C6 şekerleri, biyo-etanol, siyah likör, ham bitkisel yağ gibi platform kimyasalların elde edilmesi üzerine Türkiye’de yapılan önemli çalışmalar vardır. Ancak platform kimyasallarından etilen, propilen, bütandiol, tetrahidrofuran, yüzey aktif maddeler, elyaflar, aromalar, pigmentler vb. biyo-kimyasalların ve/veya son ürünlerin eldesine yönelik çalışmalar son derece sınırlıdır. Biyokimyasalların ve biyo-ürünlerin üretim teknolojilerinin kazanılması için tüm THS seviyelerinde çalışmaların desteklenmesi önem arz etmektedir.

Kısa vadede 1-2 yıl, orta vadede 2-4 yıl ve uzun vadede 4-6 yıl süreli projeler

Önerilen toplam proje bütçesi: araştırma projeleri için 1-2 milyon TL/proje, pilot çalışma içeren projeler için 10-15 milyon TL/proje ve demonstrasyon projeleri için minimum 100 milyon TL/proje destekleri

2.1.c. Biyokimyasal Dönüşüm Proseslerine dayalı biyorafineri teknolojileri ve uygulamalarının geliştirilmesi

- Biyoteknolojik prosesler ile gaz (hidrojen,metan vb.) ve sıvı (etil alkol bütanol, aseton vb.) ürünlerin üretimi
- Biyogaz tesisi gibi biyorafinerilerde oluşan sıvı ve katı çıktılarının (digestatın) tarımda organik gübreler olarak kullanımı için uygun teknoloji ve uygulamaların geliştirilmesi

Temel araştırma projeleri: Kısa vade en az 2 yıl- Bütçe: 2 milyon TL'ye kadar.

Uygulama projeleri: Pilot ölçek uygulamaları, orta vade 3-5 yıl. Bütçe: 3-5 milyon TL

Kapasite geliştirme projeleri: İnsan gücü yetiştirmeye yönelik ulusal ve uluslararası eğitim programı, çalıştay vb. kısa vadeli projeler 2 yıl. Bütçe 1-1.5 milyon TL

Yönetim destekleme projeleri: İlgili yönetmeliklerin hazırlanması amacıyla en az 3 yıl: 1 milyon TL .

Eş güdümlü projeleri: Büyük ölçekte teknoloji transferi ya da teknoloji uygulamalarını içeren projeler, en az 3 yıl. Bütçe: 3-4 Milyon TL.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Biyoenerji alanında 2030-2050 yılları arasında kısa-orta ve uzun vade uygulama planlarının hazırlanması, SWOT analizi yapılarak mevcut kapasite, riskler ve fırsatlar tanımlanmalıdır. Stratejik plan yaklaşımı ile zaman çizelgeleri ile takvimlendirme yapılmalıdır. Teknoloji transfer ofisleri, sektör firmaları ve üniversiteler ile çalışma toplantıları yapılarak karar mekanizmaları oluşturulmalıdır. Sektöre, finans destekleri ve yurtdışı ortaklıklarının kurulması için avantajlar sağlanmalıdır. Biyoenerji üretim tesislerinin yaygınlaşması için kanunlar/ yönetmelikler vb dökümantasyonun hazırlanması veya varsa mevcutların güncellenmesi, sektör buluşmaları ile bilginin yayılımı sağlanmalıdır.

Geliştirilen Bitki Besin ürünlerinde gübre, mazot vb. konularda verilen tarımsal teşviklerden yararlandırılması için ilgili yönetmeliklerde düzenleme yapılması gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevzuat değiştirilmesi gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Özellikle hidrojen güvenliği konusunda sertifikasyon, denetleme ve uygulama yöntemlerinin uygulamaya alınması gereklidir. Hidrojen dağıtımını ya da elektriğe dönüşümü konusunda teknik altyapı gereklidir.

Üretim konusunda ülkemiz genelinde EPC kapsamında tesis kurulması mümkün değildir.

İnsan Kaynakları

Proseslerin inşasında ve işletilmesinde insan kaynağı yeterli olmayıp kısa dönem eğitim programları ile personelin yetkinliği sağlanabilir.

Biyoenerji üretimi konusunda Üniversitelerde yeterli akademisyen insan kaynağı mevcuttur.

Sektörün biyometan hakkında bilgi birikimi ve uygulama bilgisi yeterlidir. Ancak biyohidrojen, biyobütanol ve biyohitan üretimindeki farkındalığı ve uygulama yetkinliği düşüktür.

Ülkemizde yeterli sayıda Ar-Ge, mühendis, uzman kadrosu oluşmamıştır. Uzman, Akademisyen, Mühendis ihtiyacı vardır.

Destek ve Teşvikler

Temiz enerji üretim maddi teşvikleri, biyoenerji satışı destekleri.

Yatırım Teşvik Belgesi

Gübrede kullanımında verilen tarımsal desteklere eş değer veya üzerinde tarımsal destek sağlanması gerekir.

Uygulama yönetmeliklerinin yayınlanması gerekir.

KAYNAKLAR

- [1]. A. Saravanan, P. Senthil Kumar, S. Jeevanantham, S. Karishma, Dai-Viet N. Vo, (2022), Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass, Bioresource Technology, 344, Part B, 126203.
- [2]. M. V. Rodionova, A. M. Bozieva, S. K. Zharmukhamedov, Y. Kit Leong, J. Chi-Wei Lan, A. Veziroglu, T. N. Veziroglu, T. Tomo, J.S. Chang, S.I. Allakhverdiev, (2022). A comprehensive review on lignocellulosic biomass biorefinery for sustainable biofuel production, International Journal of Hydrogen Energy, 47/3, 1481-1498.
- [3]. X.Wanga, Y. Zhang, C.Xia, A. Alqahtani, A. Sharma, A.Pugazhendh, (2023) A review on optimistic biorefinery products: Biofuel and bioproducts from algae biomass, Fuel,338, 127378.
- [4]. Y. Jiang, Y. Lv, R. Wu, Y.Sui, C. Chen, F. Xin, J. Zhou, W. Dong, M. Jiang, (2019) Current status and perspectives on biobutanol production using lignocellulosic feedstocks, Bioresource Technology Reports, 7, 100245.

- [5]. A. Morone, R.A. Pandey, (2014) Lignocellulosic biobutanol production: Gridlocks and potential remedies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 21-35.
- [6]. X. Li, Y. Chen, J. Nielsen, (2019) Harnessing xylose pathways for biofuels production, *Current Opinion in Biotechnology*, 57, 56-65.
- [7]. S.H. Kim, Y.D. Yi, H. J. Kim, S. K. Bhatia, R. Gurav, J.M. Jeon, J.J. Yoon, S.H. Kim, J.H. Park, Y.H. Yang, (2022) Hyper biohydrogen production from xylose and xylose-based hemicellulose biomass by the novel strain *Clostridium* sp. YD09, *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108624.
- [8]. N. T. Sahrin, K. S. Khoo, J. W. Lim, R. Shamsuddin, F. M. Ardo, H. Rawindran, M. Hassan, W. Kiatkittipong, E. A. Abdelfattah, W. D. Oh, C. K. Cheng (2022) Current perspectives, future challenges and key technologies of biohydrogen production for building a carbon-neutral future: A review, *Bioresource Technology*, 364, 128088.
- [9]. I.K. Kapdan, F. Kargi, (2006) Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38/5, 569-582
- [10]. N. Azbar and K. Kapdan Use of Immobilized Cell Systems in Biohydrogen Production, *State of the Art and Progress in Production of Biohydrogen* Editor's Nuri Azbar, David Levin, Chapter 13, page 227. E-book.
- [11]. H. Argun, P. Gökfiliz, İ. Karapınar (2016) Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective, editors, Anoop Singh, Dheeraj Rathore, , Springer, 11-48.
- [12]. X. Wei, J. Feng, W. Cao, L. Guo, (2021) Enhanced biohydrogen production by an ammonium-tolerant *Rhodobacter capsulatus* from sugarcane bagasse, *Fuel*, 300, 121009.
- [13]. G. Kars, A. Ceylan, (2013) Biohydrogen and 5-aminolevulinic acid production from waste barley by *Rhodobacter sphaeroides* O.U.001 in a biorefinery concept, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38/14, 5573-5579.
- [14]. D. Cheng, H.H. Ngo, W. Guo, S. W. Chang, D. D. Nguyen, X. T. Bui, W. Wei, B. Ni, S. Varjani, N. B. Hoang, (2022) Enhanced photo-fermentative biohydrogen production from biowastes: An overview, *Bioresource Technology*, 357, 127341,
- [15]. F. Micolucci, M. Gottardo, D. Bolzonella, P. Pavan, (2014) Automatic process control for stable bio-hydrogen production in two-phase thermophilic anaerobic digestion of food waste, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39/31, 17563-17572.
- [16]. O. Sarkar, S. V. Mohan, (2017) Pre-aeration of food waste to augment acidogenic process at higher organic load: Valorizing biohydrogen, volatile fatty acids and biohydrogen, *Bioresource Technology*, 242, 68-76.

- [17]. F. Karaosmanoglu Gorgeç, I.Karapinar, (2019) Production of biohydrogen from waste wheat in continuously operated UPBR: The effect of influent substrate concentration, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44/32, 17323-17333
- [18]. M. M. Yeshanew, L. Frunzo, F. Pirozzi, P. N.L. Lens, G. Esposito,(2016) Production of biohythane from food waste via an integrated system of continuously stirred tank and anaerobic fixed bed reactors, *Bioresource Technology*, 220, 312-322.
- [19]. R. Arora, N. K. Sharma, S. Kumar, R.K. Sani, (2019)Chapter 9 - Lignocellulosic Ethanol: Feedstocks and Bioprocessing, Editor(s): Ramesh C. Ray, S. Ramachandran, *Bioethanol Production from Food Crops*, Academic Press, 165-185.
- [20]. S..Singh, A..Kumar, N. Sivakumar, J. P. Verma, (2022) Deconstruction of lignocellulosic biomass for bioethanol production: Recent advances and future prospects, *Fuel*, 327, 125109.
- [21]. S. L. M. Salles-Filho, P. F. Drummond de Castro, A. Bin, C. Edquist, A. F. P. Ferro, S. Corder, (2017) Perspectives for the Brazilian bioethanol sector: The innovation driver, *Energy Policy*, 108, 70-77.
- [22]. I. Maltsoğlu, T. Koizumi, E. Felix (2013) The status of bioenergy development in developing countries, *Global Food Security*, 2/2, 104-109.
- [23]. Y.Liu, Y. Yuan, G. Ramya, S. M. Singh, N. T.L. Chi, Arivalagan Pugazhendhi, Changlei Xia, Thangavel Mathimani, (2022) A review on the promising fuel of the future – Biobutanol; the hindrances and future perspectives,.*Fuel*, 327, 125166.
- [24]. C. Karthick, K. Nanthagopal,(2021) A comprehensive review on ecological approaches of waste to wealth strategies for production of sustainable biobutanol and its suitability in automotive applications, *Energy Conversion and Management*, 239, 114219,
- [25]. I.Veza, M. F. M. Said, Z. A. Latiff, (2021) Recent advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation, *Biomass and Bioenergy*, 144, 105919.
- [26]. A. Kujawska, J. Kujawski, M. Bryjak, W. Kujawski, (2015) ABE fermentation products recovery methods—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 648-661.
- [27]. K. Knozowska, A. Kujawska, G. Li, J. Kujawa, M. Bryjak, W. Kujawski, F. Lipnizki, L. Ahrné, I. Petrinić, J.K. Kujawski, (2021) Membrane assisted processing of acetone, butanol, and ethanol (ABE) aqueous streams, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 166, 108462.
- [28]. M. S. Manna, A. Mazumder, T. K. Bhowmick, K. Gayen, (2023) Economic analysis of biobutanol recovery from the acetone-butanol-ethanol fermentation using molasses, *Journal of the Indian Chemical Society*, 100/1, 100809.

Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.

2.2. Biyorafinerilerde kullanılacak biyoreaktör verimlerinin artırılması

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 2.2.a. Biyorafinerilerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi**
- 2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi**

Kritik Ürün/Teknoloji 2.2.

2.2. Biyorafinerilerde kullanılacak biyoreaktör verimlerinin artırılması

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Biyorafineri, biyokütleden yakıt, güç ve katma değerli kimyasallar üretmek için biyokütle dönüştürme aşamalarını ve ekipmanlarını entegre eden, çevreye zarar vermeden dögüsel ekonomiyi hayata geçiren tesistir. Biyorafineriler, temelde geleneksel fosil rafinerilerine benzemekte olup hammadde olarak fosil yakıtlar yerine karbon döngüsü açısından nötr olan biyokütle kullanırlar. Biyorafineriler, biyokütle termal, kimyasal ve biyolojik prosesler sayesinde biyoyakıt, biyogüç, biyokimyasal ve biyomalzemelere dönüştürürler. Biyorafineri tesislerinde elektrik ve ısı enerjisi üretilebildiği gibi, katı biyoyakıtlar (biyo-kömür, briket pelet), sıvı biyoyakıtlar (biyo-etanol, biyo-dizel, biyo-metanol, biyo-oil), gaz biyoyakıtlar (biyo-metan, biyo hidrojen, sentez gazı) hayvan yemi, organik gübre ve diğer katma değerli kimyasallar (uçucu yağ asitleri, biyopolimerler, kompozitler yapı malzemeleri, çözücüler, yüzey aktif maddeler v.b) ve diğer biyomalzemeler de üretilebilmektedir.

Biyorafineri ürünlerinin elde edilmesinde kullanılan biyokütle çoğu durumda direkt kullanıma uygun olmayıp ön işlemlerden (safsızlıklardan arındırma için ayırma ve ayıklama yapılması, dane boyutunun küçültülmesi için parçalama, kurutma, ön hidroliz veya enzimatik parçalama v.b) geçirilmesi gerekmektedir

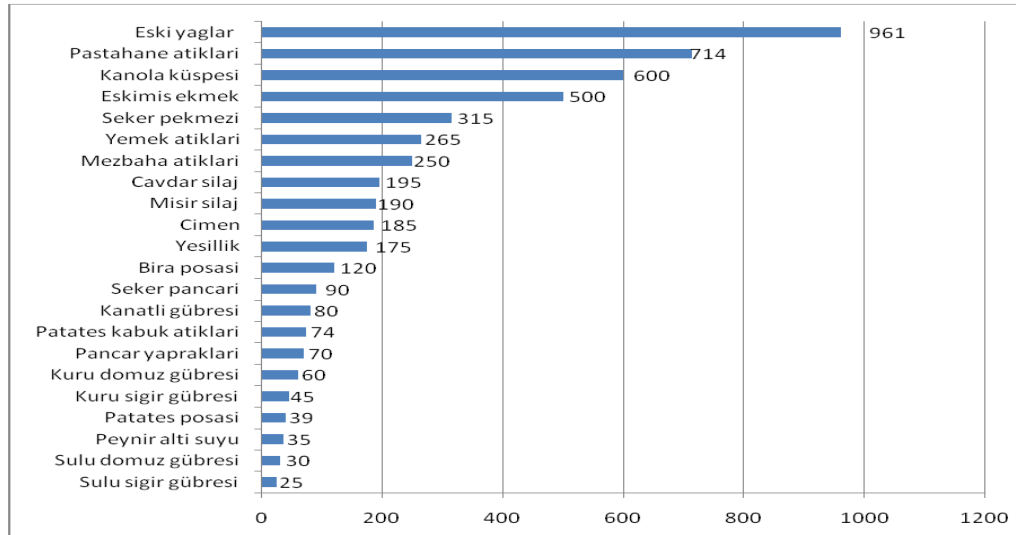
Hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemleri enerji yoğun işlemler olup, enerji verimli, ölçeklendirilebilir ve yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

2.2.a. Biyorafinerilerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

Biyokütleden biyogaz üretimi oldukça gelişmiş bir teknolojidir. Organik maddece zengin tüm organik atıklardan (kentsel katı atıklar, hayvan gübreleri, tarımsal atıklar, park&bahçe atıkları, gıda üretimi ve işleme atıkları v.b) yüksek oranda biyogaz üretimi yapılması mümkündür. Bu

atıkların bazıları özellikle kentsel katı atıklar içerisinde oldukça yoğun miktarda safsızlıklar (cam, demir, kağıt, plastik, taş, çakıl v.b) barındırırlar ve biyorafineri tesislerinde biyolojik dönüşüm süreçlerine alınmadan önce bu safsızlardan arındırılması önem arz etmektedir. Diğer organik atıklar ise hidrolizi zor dane boyutlarına veya selülozik içeriklere sahip olabilirler, bu nedenle fiziksel kimyasal ve/veya termal parçalama işlemlerinden sonra yakıt üretim süreçlerinden dahil olabilirler. Ülkemizde kentsel katı atık üretimi kişi başına 1,16 kg mertebesinde olup yıllık ortalama 45 Milyon ton karışık atık oluşumu söz konusudur. Bu atıkların ortalama % 55'i organik madde olup biyogaz üretimine son derece uygundur (bkz Şekil 2.6 ve Tablo 2.6). Kentsel katı atıkların ıslak bazda ton başına ortalama biyogaz üretim potansiyeli 70-140 m³ olup tüm kentsel katı atığın biyorafineri bazlı biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi halinde yılda 1,4 -2,7 milyar metreküp biyogaz (% 55 CH₄ içerikli) elde etmek mümkündür. Benzer şekilde diğer organik atıklar da dikkate alındığında (300 milyon ton/yıl hayvan gübresi, 130 milyon ton/yıl sera atıkları) ülkemiz doğal gaz tüketiminin (59 milyar m³/yıl; 2022 yılı) neredeyse % 89'unun biyorafinerilerde üretilebileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 2.6. Organik Atıkların Biyogaz Potansiyelleri (m³/ıslak ton)

Tablo 2.6. Tarımsal Atıkların Biyogaz Potansiyelleri (m³/ton organik madde)

Substrat	Kuru maddesi (%)	Organik Kuru Madde (%)	Biyogaz Üretimi (m ³ /oKM)
Üzüm posası	40-50	80 - 95	0.6 - 0.7
Atık Hububatlar	90	95	0.6
Maya (Kaynatılmış)	10	92	0.72
Atık Şerbetçi Otu	97	90	0.8-0.9
Atık Elmalar	22-45	85-97	0.56-0.68
Elma Püresi	2-3	95	0.5
Atık meyveler	25-45	90-95	0.4-0.7
Sebze Atıkları	5-20	76-90	0.4
Yapraklar	-	82	0.6
Yeşil ot (taze)	12-42	90-97	0.4-0.8
Bahçe Çimleri	37	93	0.7-0.8
Silolanmış Çimler	21-40	76-90	0.6-0.7
Çayır otu	15-20	89-93	0.6-0.7
Şeker pancarı	12-23	80-95	0.7
Şeker pancar püresi	22-26	95	0.9
Patates sapsarı	25	79	0.8-1.0
Yonca	20	80	0.6-0.8
Ay Çiçeği	35	88	-
Sorgum (süpürge darısı)	24-26	93	-
Mısır gevreği	85-90	85-89	0.4-0.9
Mısır kamışı, sapı	86	72	0.4-1.0
Pirinç samanı	25-50	70-95	0.55-0.62
Patates püresi, patates küspesi, kabukları	6-18	85-96	0.3-0.9
Fermentasyon mayşesi	2-5	90-95	0.5-0.85
Distilasyon mayşesi	2-8	65-85	0.42
Preslenmiş yağlık tohum atığı	92	97	0.9-1.0
Melaz	77-90	85-95	0.3-0.7
Buğday unu	88	96	0.7
Çimlenmiş malt	92	93	0.6
Büyükbaş Hayvan atığı (sıvı)	6-11	68-85	0.1-0.8
Büyükbaş Hayvan atığı (katı)	25-30	80	0.6-0.8
Domuz dışkısı (sıvı)	3-10	77-85	0.3-0.8
Domuz dışkısı (katı)	20-25	75-80	0.27-0.45
Tavuk dışkısı (katı)	10-29	67-77	0.3-0.8

1 m³ doğalgazın 2,186 kg CO₂ karbon ayak izi olduğu dikkate alındığında ülkemizin organik atıkların biyogaz dönüştürülmesi ile karbon emisyonlarından sağlayacağı tasarruf ortalama 165 milyon ton mertebesindedir.

Öte yandan karbonhidratça zengin biyokütle kaynaklarından biyolojik yollarla biyo-etanol üretimi de özellikle ulaşırmada benzine alternatif olarak önemli bir fırsat sunmaktadır. 1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında ortaya çıkan yakıt krizi nedeni ile fosil yakıtlara alternatif yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dünya'da başta Brezilya ve Amerika olmak üzere şeker kamışı ve mısır gibi nişastaca zengin organik materyalden üretimi yapılmaktadır. Hacimsel olarak farklı yüzdelerde benzin ile karıştırılarak oktan sayısı artırabildiği gibi uygun fleksi motorlarda % 50 ve üstüne kadar kullanımı mümkündür. Benzine kıyasla yüksek oktan sayısına sahip olması kısa sürede tutuşması ile yüksek enerji verimine olanak sağlamaktadır. Etanol biyolojik olarak parçalanabilir ve %35 oksijen içerir, bu da geleneksel yakıtlara kıyasla yanma sırasında partikül ve NOx emisyonlarını azaltır. Bir katkı maddesi ve bir oksijenat olarak

ve ayrıca oktan sayısını yükseltmek için kullanılan Metil Tersiyer Bütil Eter (MTBE) 'nin yerini alabilir.

Kanola, aspir, mısır ve diğer yağ ve karbon hidratça zengin enerji bitkilerinden de biyodizel ve biyoetanol gibi karbon nötr sıvı yakıtların üretimi dikkate alındığında Ülkemiz AB Yeşil Mutabakatı 2050 de-karbonizasyon hedeflerine çok daha hızlı ve kolay uyum sağlayabilir.

Biyorafinerilerde kullanılan hammaddelerin safsızlıklarının giderilmesi, gaz, sıvı veya katı yakıtlara dönüştürülmesinden önce gerekli olan ön işlemleri (ayırma & ayıklama, parçalama, kurutma, hidroliz v.s) enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi için mevcut teknolojilerin ön işlem özelinde enerji kullanımlarının belirlenmesi (Ulusal ve uluslararası mevcut teknolojilerin karşılaştırmalı incelenmesi ile) önem arz etmektedir.

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

Petrol esaslı plastiklerin yarattığı çevresel problemler nedeniyle, biyolojik olarak parçalanabilen bioplastik üretime geçiş gereklidir. Dünyada, biyoplastik için biyopolimer üretim kapasitesi 2021 yılında 2.4 milyon tondur ve 2029 yılına kadar 3 kat artış göstererek 7.5 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Petrol esaslı plastiklere nazaran üretim maliyeti 5-10 katı kadardır ve hammadde maliyeti üretimin %30'na karşılık gelmektedir. Ancak, bioplastik üretimindeki talep ihtiyacının hızla artması sebebiyle ekonomik ve yüksek verimlilikte biyolojik üretim teknolojilerine ihtiyaç vardır. Basit şekerler kullanılarak üretim yerine organik atıklardan üretim teknolojilerine geçiş ile üretim maliyetinin düşürülmesi mümkündür. Biyopolimer esaslı plastik kullanımı 2016 yılından 2021 yılına kadar %161 oranında artış göstermiştir. Bioplastik üretiminde hammadde olarak %55 oranında polihidroksialkonat (PHA), polilaktik asit (PLA) ve nişasta kullanılmaktadır. Biyoplastik üretiminde Avrupa'nın payı %18, Kuzey Amerika'nın ise %16'dır. Asya %56 üretim payı ile sektörde lider konumdadır. Biyoplastik üretimi hızla artış göstermekle birlikte günümüzde plastik üretimindeki oranı henüz %1'dir.

Biyoplastik türlerinden polihidroksialkonat (PHA) ve polilaktik asit (PLA) fermentasyon teknolojileri kullanılarak üretilmektedir. PHA, beş karbona kadar kısa zincirli ve 6-14 karbona kadar orta zincirli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Kısa zincirli PHA'lar poli-3-hidroksi butirat (PHB), poli-4 hidroksi butirat ve poli 3-hidroksivalerat olup, yapısal olarak konvensiyonel plastiklerle benzerlik göstermektedir. Bu nedenle bioplastik üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. PHA, bakteri, fungi, maya ve alglerin sitoplazmasında sentezlenerek karbon ve besin kaynağı olarak depolanmaktadır. Organizmanın özelliklerine göre aerobik veya anaerobik şartlarda PHA sentezlenebilir. Genellikle karbon ve besin yeterli şartlarda

üretilebildiği gibi besin eksikliği şartlarında da üretimi gözlenebilmektedir. Diğer bir ifade ile logaritmik büyüme ya da durgun büyüme fazında PHA sentezi gerçekleşmektedir. Basit şekerler temel karbon kaynağı olarak kullanılmakla birlikte asetik asitten de üretimi mümkündür. PHA'nın biyoplastikteki payı %1 civarındadır. PHA-BHB içerikli biyoplastiklerin atık olması durumunda anaerobik şartlarda arıtımı mümkündür. PHA veya PHB üretimi sırasında yan ürün olarak biyosurfaktan, amino asit ve enzim üretimi de sağlanabilir.

Polilaktik asit (PLA) biyoplastik üretiminde laktik asit temel monomer olarak kullanılmaktadır ve polimerizasyonu ile polilaktat üretimi sağlanmaktadır. Laktik asit üretimi ise anaerobik şartlarda fermantasyonla gerçekleşmektedir. Fermantasyonda L-laktik asit ya da D-Laktik asit üretilebilir. Üretilen laktik asit kimyasal polimerizasyonla PLA' ya dönüştürülür. L ya da D formuna göre plastiğin kalitesinde farklılık gözlenmekle birlikte L ve D laktik asit karışımından elde edilen biyoplastiğin kalitesinin daha yüksek olduğu görülmüştür. PLA'nın biyoplastikteki payı %15 civarındadır. PLA içerikli bioplastiklerin anaerobik arıtımı PHA'ya nazaran kısmen daha zor gerçekleşmektedir.

Fermantasyon teknolojileri ile PHA üretimi kullanılan substrat derişimine ve organizma türüne göre değişiklik göstermektedir. Üretim miktarı biyokütlenin kuru ağırlığının %PHA veya %PHB içeriği olarak raporlanmakta olup, bu oran %15-%65 aralığında değişmektedir. PHA ayırma için kimyasal ekstraksiyon, ultrasonikasyon, yüksek sıcaklık ve solvent ekstraksiyonu, alkali-solvent ekstraksiyonu, homogenizasyon ve ekstraksiyon ile surfaktan destekli ekstraksiyon yöntemleri uygulanmaktadır.

PLA, laktik asitin polimerizasyonundan elde edildiğinden temel amaç fermantasyonda laktik asit üretim verimini arttırmaktır. Sitokiyometrik olarak 2 mol laktik asit/ mol glukoz'dur (yaklaşık 1 g laktat/g glukoz). Ancak diğer organik asitlerin ya da etanolün oluşması durumunda teorik verim 1 mol laktik asit/ mol glukoz'a (0.5 g laktat/ g glukoz) düşmektedir. Basit şekerlerden, melas ve nişasta içerikli atıklardan laktik asit üretim verimi 0.9-1.40 g/g gibi yüksek değerlere ulaşabilirken, lignoselülozik atıklardan üretim verimi 0.25 -0.9 g/g aralığında elde edilmektedir. Verimlilik ise yine substrat türüne göre değişmekle birlikte 0.5- 12 g/L/saat aralığında elde edilmiştir.

Laktik asidin biyoplastik üretimine uygun hale gelmesi için %84'ün üzerinde saflıkta olması gereklidir. Bu amaçla, kimyasal çöktürme işlemi kullanılmakla birlikte adsorpsiyon, iyon değiştirici ile ayırma çevresel açıdan daha uygundur. Ancak, seçici ayırma işlemi olarak membran teknolojilerinin kullanılması istenilen saflığı sağlamak ve diğer yan ürünleri de eş zamanlı ayırmak için uygun bir teknolojidir.

Lignoselülozik atıklarla mikro ve makro alglerden PHA ve PLA üretim prosesi ön işlemler, fermantasyon ve ürün ayırma aşamalarından oluşmaktadır. Ürün oluşum hızını arttıracak

biyoproses teknolojileri ile metabolik reaksiyonları laktik asit üretimine yöneltecek stratejiler geliştirilmelidir. Biyoplastik maliyetleri petrol esaslı plastiklerle rekabet edecek durumda değildir. Bu nedenle üretim maliyetini düşürmek için, ön işlem ve ürün ayırma basamaklarında ekonomik yöntemlerin geliştirilmesi gereklidir. PLA için ise tek basamak eş zamanlı, hidroliz-fermantasyon ve ürün ayırma teknolojilerinin geliştirilmesi ile üretim maliyetinin düşürülmesi mümkündür. Biyokütleden laktik asit üretiminde üretim verimini arttırmak üzere yenilikçi biyoreaktör tasarımı, ölçeklendirme ve eş zamanlı ürün ayırma teknolojilerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bağlı büyümeli biyoreaktör sistemleri yüksek mikroorganizma tutma kapasitesi ile düşük alıkonma sürelerinde işletim olanağı sağladığı için tercih edilmektedir. Bu amaçla, dolgulu kolon, akışkan yataklı ve genişletilmiş yatak vb biyoreaktör sistemleri kullanılmıştır. Bağlı büyüme sistemlerinde mikrororganizma destek taneciği seçim, reaktörde katı-sıvı teması, reaktör içi kanallaşma, biyokütle tutma kapasitesi, ve gaz-sıvı ayrımı açısından önem taşımaktadır. Gözenekli mikroorganizma destek taneciği tercih edilirken, taneciğin dayanıklılığı da diğer bir unsurdur. Tıkanma ve reaktör içi kanallaşma bağlı büyüme sistemlerinde gözlenen işletme problemlerdir. Bu tür reaktörler sıvı besleme yapılmaya uygundur, atık biyokütlenin doğrudan reaktöre beslenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, bağlı büyümeli sistemler öncesinde biyokütlenin fiziksel veya kimyasal yöntemlerle hidrolize edilerek fermente edilebilir şeker içeriğinin sıvı faza geçirilmesi ve biyokütle taneciklerinin ayrılması gereklidir. Katı faz fermentasyonu, eş zamanlı sakkarifikasyon ve fermentasyon ya da ekstraktif fermentasyon katı biyokütlenin doğrudan fermentasyonu için kullanılan diğer biyoproses yaklaşımlardır. Hidroliz ve fermentasyonun eş zamanlı olması sebebiyle, reaksiyon hızı yavaşlamakta ve ürün oluşum süresi (alıkonma) uzamaktadır. Bu tür biyoreaktörlerde karışım, homojenite, ürün ayırma teknolojileri ile ölçeklendirme araştırmaya açık alanlardır.

- Lignoselülozik atıkların ön işleminde yeşil teknolojilerin kullanılması ya da eş zamanlı hidroliz-fermantasyon-ürün ayırma teknolojilerin uygulanması,
- Üretim verimini arttırmak üzere yenilikçi biyoreaktör tasarımları
- Laktik asit üretiminde verimliliğin 10 g/L/ saat ve üretim veriminin en az 1 g/g olması,
- PHA üretiminde ise hücrenin kuru ağırlığının %60'nın üzerine çıkarılması,
- Ürün ayırma veriminin %70-80 ulaşması,
- Biyolojik olarak parçalanabilen plastiklerin maliyetinin 2 USD / kg ila 6 USD / kg arasında değişmesi ve bu nedenle üretim maliyetini düşürmek üzere teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

2.2.a. Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

Biyokütlenin üretimde hammadde olarak kullanılmadan önceki tabii tutulduğu ön işlemlerin (ayırma & ayıklama, parçalama, kurutma, hidroliz v.b) hazırlık seviyeleri Dünyada ve Türkiye’de 7-9 seviyesindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

Dünya’da teknoloji seviyesinin her iki tür biyoplastik için THS 7-9 olduğu değerlendirilmektedir. Türkiye’de ise PLA ve PHA’nın ithal edilmesi sebebiyle teknoloji seviyesinin temel araştırma seviyesinde olduğu tahmin edilmektedir. Ancak, temel araştırma seviyesindeki bilgi birikiminin pilot ölçeğe çıkarılması için yeterli olduğu düşünülmektedir. Türkiye’de (Asetik asit ve Laktik asit hariç) THS seviyesi THS=2-4, Asetik asit ve Laktik asit için THS: 7-9 olarak tanımlanabilmektedir. Dünyada ise THS:7-9’dur.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
--------------------------------	---------	------------

THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

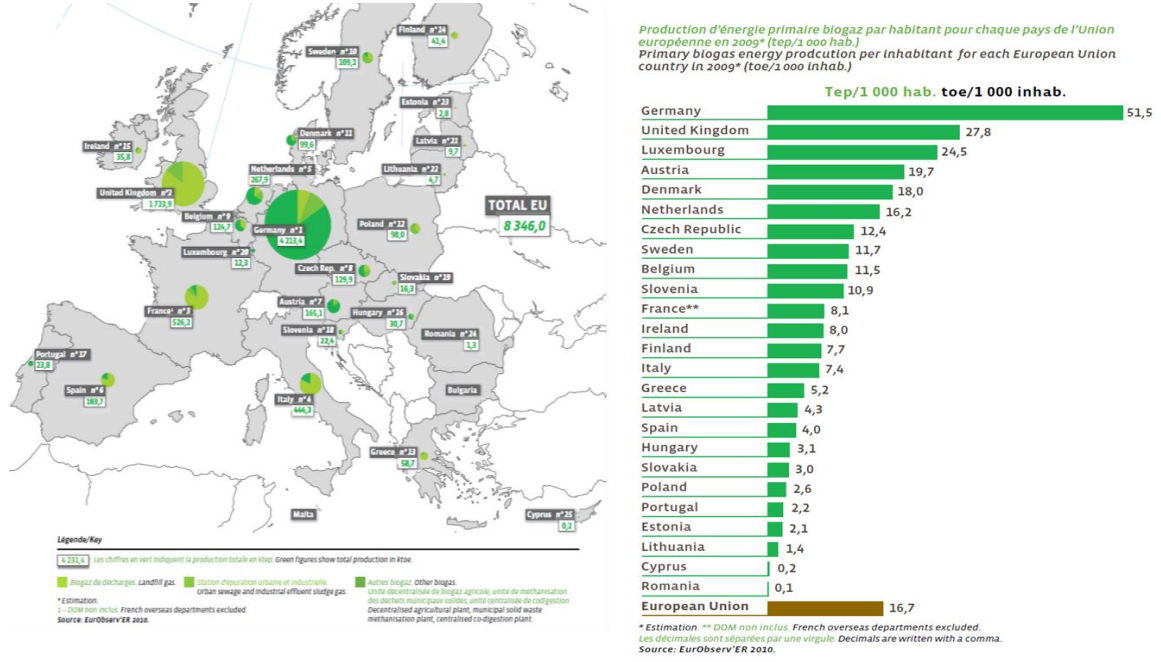
C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

2.2.a. Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

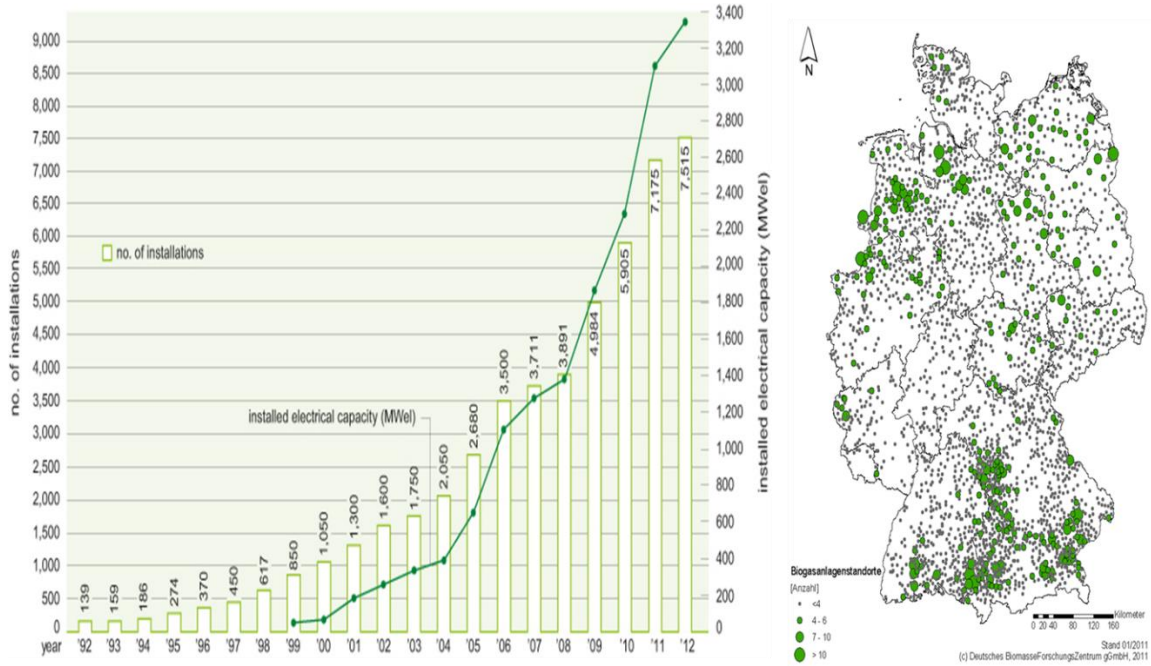
Biyokütleden sıvı ve/veya gaz yakıt üretimi konusunda THS seviyesi oldukça gelişmiş olup ticari olarak uygulamaları çok fazladır (THS \geq 8-9). Biyokütleden sentez gazı ve biyokömür üretimleri üzerine çalışmalar henüz sanayi ölçeğinde yaygın değildir. Dünya’da sentez gazından biyoetanol üreten firmalar bulunmaktadır.

Biyokütleden biyogaz üretimi üzerine Avrupa’da 18.000’e yakın tesis (bkz Şekil 2.7.) hali hazırda bulunmaktadır. Bu tesislerin 9300 adedi Almanya’da konuşlanmıştır (bkz Şekil 2.8).

Dünya’da sentez gazından biyoetanol üreten firmalar bulunmaktadır; INEOS Bio; LanzaTech; Coskata; Synata Bio.



Şekil 2.7. Avrupa'da Biyogaz Üretim Değerleri



Şekil 2.8. Almanya'da Biyogaz Tesisleri Sayısı Ve Konuşlanması

Ülkemizde biyokütleden biyogaz üretim tesisleri 2011 yılında YEK Kanunu ile sunulan teşvikler doğrultusunda sayıları 106'ı bulmuş olmakla beraber 2022 yılındaki % 44'lük teşvik kesinleri ile bu alandaki faaliyetler durma noktasına gelmiştir.

Türkiye'deki biyoetanol üretiminde hammadde olarak, şeker pancarı, buğday ve mısır kullanılmaktadır. Yıllık ortalama olarak 162 milyon litre üretilmektedir. Bunun % 46.9'una tekabül eden kısmı yakıt için kullanılmaktadır. Yakıt için üretilen biyoetanolün % 8'i ihraç edilmekte % 92'si ülkenin akaryakıt ihtiyacı için benzinle harmanlanarak tüketilmektedir. Türkiye'de biyoetanol üreten firmalar; Konya şeker (Melas); TEZKİM (Mısır, Buğday); TARKİM (Mısır, Buğday).

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

PHA ticari olarak Çin-Amerika ve Avrupa ülkelerinde üretilmektedir. Üretim kapasiteleri 1000 - 10000 ton/yıl aralığında değişmektedir.

Evonik, NatureWorks LLC, Futerro, Sulzer Ltd, Synbra Technology BV, Total Corbion PLA, Danimer Scientific, PLA üreten şirketlerdir.

Türkiye'de büyük ölçekli hammadde sağlayacak şekilde biyoplastik üretimi yapılmamakta, ithal edilmektedir. Türkiye'de başlıca biyoplastik hammadde ithalatçıları; Kumru Kimya, Gema Polimer, Resinex ve Sunar Gruptur. Türkiye'de 2016 yılında 65 bin ton olan biyoplastik hammadde tüketiminin 2020 yılında 80 bin tona çıktığı tahmin edilmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

2.2.a. Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için makine mühendisliği ve çevre mühendisliği disiplinleri bir arada çalışmalıdır. Tarla makineleri ve diğer makine üretimi yapan (öğütücü, parçalayıcı, pelet yapıcı, kurutucu, ayıklayıcı, çelik tank imalatı ve karıştırıcı imalatçıları) sektörler üniversite ve/veya Ar&Ge merkezlerindeki araştırmacılarla ortaklaşa çalışabilirler.

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için bir arada çalışması gereken disiplinlerden (bilim dallarından) uzmanlar:

- Genetik mühendisliği ve biyoteknoloji: PHA ve laktik asit üreten tür iyileştirmeleri
- Çevre ve Kimya Mühendisliği: Ön işlemler, biyoproses, ayırma ve saflaştırma teknolojileri geliştirme
- Sektör temsilcileri: Plastik üretimi yapan ve kullanan sektörlerle proseslerin uygulamaya alınması,
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı: Atık yönetimi ile ilgili ulusal ve uluslararası yönetmeliklerin hazırlanması

Birarada çalışması gereken sektörler kuruluşları:

- Çevre, Biyoteknoloji, Kimya ve Kimya Mühendisliği alanların ortak çalışması ile proses geliştirilmesi, ürün kalitesinin değerlendirilmesi.
- Sektör- Üniversite İşbirliği: Biyoplastiklerin, ürün paketlemede kullanılması için denemelerin yapılması.
- Üniversite-Sektör Eğitim İşbirliği: İnsan kaynağının yetiştirilmesi, eğitimler, farkındalık.
- Üniversite-Sektör İşbirliği: Toplumsal farkındalık çalışmalarının yapılması ve biyoplastik içeren ürünlerin tercih edilmesi için ürün tanıtım çalışmalarının yapılması

Üniversite, Bakanlık ve Özel sektörün katkısı alınmalıdır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

2.2.a. Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

Büyük sanayi kuruluşları, Ar-Ge merkezleri ve akademik ortaklar, biyorafineriler için yenilikçi teknolojilerin ve çözümlerin üretilmesi amacıyla küçük/orta/büyük ölçekli Ar-Ge ve yenilik projeleri, teknoloji platformları, yenilik ağları vb gibi her türlü ortamda uygun kapsamlar altında bir araya getirilebilir. Destek mekanizmaları için benzer AB Horizon Europe çağrıları örnek alınabilir.

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

D maddesinde belirtilen disiplinler ve sektörler küçük/orta/büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri, Teknoloji Platformları, Yenilik Ağları ile bir araya gelerek çalışabilirler. Destek mekanizmaları TÜBİTAK TEYDEB Sanayi Destek Programları olabilir.

Konsorsiyumlar kurulmalı, araştırma merkezlerinin yanı sıra sektör temsilcisi de projede yer almalı. Ar-Ge merkezi olan sektörlerin projelerde yer alması önerilmektedir.

PLA üretiminde, laktik asitle fermentasyonu gelişmiş bir teknolojidir. Bu nedenle laboratuvar ölçekli araştırma projeleri yerine teknoloji seviyesi yüksek, uygulamaya yönelik, pilot tesis ve ölçek büyütme çalışmalarının yürütülmesi uygun olacaktır. Orta ve büyük ölçekli projelerin desteklenmesi önerilmektedir.

Sanayi-Üniversite işbirliği projeleri TÜBİTAK 1501 ya da TÜBİTAK 1505 projeleri önerilmektedir.

Temel araştırma projeleri için TÜBİTAK 1001 projeleri uygundur.

Kapasite geliştirme projeleri için Kamu ve sektör ortak finans destekleri sağlanabilir.

Konsorsiyumlarla eş güdümlü projeler uygulanabilir.

Temel araştırma projeleri: Kısa vade en az 2 yıl- Bütçe: 2 milyon TL

Orta vade: Pilot ölçek uygulamaları orta vade 3-5 yıl. Bütçe: 3-5 milyon TL

Kapasite geliştirme projeleri: İnsan gücü yetiştirmeye yönelik ulusal ve uluslararası eğitim programı, çalıştay vb. kısa vadeli projeler 2 yıl. Bütçe 1 milyon TL

Yönetim destekleme projeleri: ilgili yönetmeliklerin hazırlanması amacıyla en az 3 yıl: 1 milyon TL .

Eş güdümlü projeleri: En az 3 yıl. Bütçe: 3-4 Milyon TL.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

2.2.a. Biyorafinerlerde hammadde olarak biyokütlenin ayırma, parçalama, kurutma ve benzeri prosesler ile hazırlanması işlemlerinde enerji verimli, ölçeklendirilebilir, yenilikçi teknolojik çözümlerin üretilmesi

Ar-Ge süresi: Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularının gerçekleştirilmesine ilişkin ortalama 1- 2 yıl süreli projeler uygundur. Kritik ürün/teknoloji için kısa vade hedeflenebilir. Her bir ön işlem kalemi için 3 milyon TL bütçe ayrılması uygundur.

2.2.b. Biyokütleden fermentasyon yöntemiyle laktik asit ve benzeri organik asitlerin üretimi, saflaştırılması ve biyoplastik üretiminde girdi olarak kullanımına yönelik verimli proseslerin geliştirilmesi

Temel araştırma projeleri: Kısa vade en az 2 yıl- Bütçe: 2 milyon TL

Orta vade: Pilot ölçek uygulamaları orta vade 3-5 yıl. Bütçe: 3-5 milyon TL

Kapasite geliştirme projeleri: İnsan gücü yetiştirmeye yönelik ulusal ve uluslararası eğitim programı, çalıştay vb. ile toplumsal farkındalık yaratmak üzere tanıtım faaliyetleri içeren kısa vadeli projeler 2 yıl. Bütçe 1 milyon TL.

Yönetim destekleme projeleri: ilgili yönetmeliklerin hazırlanması amacıyla en az 3 yıl: 1 milyon TL .

Eş güdüm projeleri: En az 3 yıl. Bütçe: 3-4 Milyon TL.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Belirlenen konuların yapılabilirliğine ilişkin kamu T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlıkları bir araya gelerek teşvik ve destek programları oluşturmalılar.

Üniversitelerde Mühendislik Fakültelerinde Makine Mühendisliği, Kimya Mühendisliği ve Çevre Mühendisliği, Ziraat Fakültelerinde Tarım Makineleri Bölümlerinde araştırma ve geliştirme projeleri ile yetkinlik seviyeleri artırılabilir.

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeyi entegre edebilmesi için konu başlığını içeren Üniversite-Sanayi projeleri desteklenebilir.

Biyoplastik üretimi yapan ve kullanan sektörlerle üretim ve tanıtım desteklerinin verilmesi

Ulusal ve uluslararası sektörel ortaklıkların kurulması yönünde destekler

Bioplastik kullanılarak ambalajlanan ürünlerin tüketimine yönelik tüketicilere özel hizmetlerin sunulması

Bioplastiklerin dönüşümü ve tekrar kullanımına yönelik destekler

Bioplastikli ürünler hakkında farkındalık yaratmak üzere kamu spotlarının hazırlanması

Bioplastiğin sağlık ve çevresel faydaların anlatıldığı sosyal medya araçlarının kullanılması

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Teknik Altyapılar

Ürünler üzerinde bioplastik kullanıldığına dair etiketler olmakla birlikte toplumsal farkındalık olmadığı için bu tür ürünlerin tercih edilmesi düşük seviyededir.

ASTM D6400: Bir ürünün kompostlanabileceğini belgelemek için yapılan test

ASTM D6868: Bir biyobozunur plastiğin gerçekten biyobozunur olup olmadığını belirlemek için yapılan test

ASTM D6866 biyoplastiklerin biyolojik olarak türetilmiş içeriklerinin belirlenmesi ve belgelendirilmesi için yapılan test

EN standardı test yöntemleri ISO standartları 14851, 14852 (suda aerobik bozunurluk), 14853 (suda anaerobik bozunurluk) ve 14855'in (aerobik kompostlama)

Plastik ürünler, uyumlaştırılmış Avrupa standardı EN 13432 veya EN 14995'i başarılı bir şekilde karşılayarak kompostlanabilirlik özellikleri kanıtlanabilir. 94/62.EC sayılı Avrupa Ambalaj Direktifi EN 13432'ye uygunluk konusunda buraya atıfta bulunur.

İnsan Kaynakları

Türkiye'de biyoplastik üretimi yapılmamaktadır, ithal edilmektedir. Bu nedenle biyoplastik üretiminde yetkin insan kaynağı mevcut değildir. Ancak biyokimya, kimya, çevre mühendisliği, kimya mühendisliği lisans programlarından mezunların eğitimlerle alan özel yetkinlik kazandırılması mümkündür.

Destek ve Teşvikler

Biyoplastik kullanan firmalara çevre ödüller, yatırım teşvikleri, vergi muafiyeti vb destekler, pilot ölçekte üretim sistemlerinin kurulması yönünde finansal destekler, girişimci destekleri, TÜBİTAK 1501-1505-1003 veya kamu projelerinin açılması. Kalkınma bakanlığı biyoplastik üretimi ve kullanımı yönünde tanıtım ve sertifikasyon destekleri.

Teknolojik Hedef 3:

MAVİ/ YEŞİL AMONYAK ÜRETİMİ

Ulaşım ve sanayide yakıt olarak, ısıtma-soğutma ve enerji dönüşüm proseslerinde ve gübre sektöründe kullanılmak üzere mavi/yeşil amonyak üretim teknolojilerinin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

3.1. Mavi Amonyak üretimine ilişkin yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.**
- 3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları**
- 3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi**
- 3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması**

Kritik Ürün/Teknoloji 3.1.

3.1. Mavi Amonyak üretimine ilişkin yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Yüksek kalorifik değere, yüksek enerji yoğunluğuna ve çeşitli kaynaklara sahip, temiz ve verimli bir ikincil enerji kaynağı olarak hidrojen enerjisi "nihai enerji" olarak bilinmektedir. Pek çok avantajı olmasına rağmen, depolanması ve taşınmasında güçlükler bulunmaktadır. Hidrojenin depolanması ve taşınması, 35 MPa'yı aşan basınçlar gerektirirken, yüksek basınçlı hidrojen depolamanın temel malzemeleri ve temel ekipmanı ithalata dayalıdır, bu da terminal hidrojen için yüksek fiyatlara neden olmaktadır. 2050 yılına kadar 10.000 hidrojen yakıt ikmal istasyonu inşa etme hedefine göre, 150–300 trilyon dolarlık altyapı yatırımı yapılması beklenmektedir. Ek olarak, yüksek basınçlı hidrojen yanıcı ve patlayıcıdır ve hidrojenin zayıf güvenliği daha belirgindir. Güvenli ve verimli bir hidrojen depolama ve taşıma teknolojisi geliştirmek, hidrojen enerjisi endüstrisinin geliştirilmesinde bir "darboğaz" sorunudur[1].

Amonyak (NH₃) kimyasal bir hidrojen depolama ortamıdır. Atmosfer basıncında amonyağın güvenli nakliyesi için -33 °C'de sıvılaştırılmaktadır. Şu anda gübre üretimi dünyadaki amonyak kullanımının %80'inden fazlasını oluşturmaktadır. Bu nedenle amonyak depolama ve taşıma için mevcut bir alt yapı bulunmaktadır. Bu nedenle amonyak hidrojen depolamak için büyük bir potansiyele sahiptir.

Yakıt hücrelerinde hidrojen kullanımı veya sanayi hidrojen talebini karşılamak için amonyak hidrojen ve azota ayrıştırılmaktadır. Sürdürülebilir amonyak üretimi (Haber-Bosch sürecine yeşil bir alternatif), Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından "Kimyada Gelişen En İyi 10 Teknoloji 2021" arasında gösterilmiştir. Birçok bilim insanı, "karbon nötrlüğü"nden kaynaklanan bir amonyak ekonomisinin kaçınılmaz olduğuna inanmaktadır. 2040 yılına kadar yeşil ve başarılı bir "amonyak ekonomisi", yani "hidrojen 2.0 ekonomisinin gerçekleşeceği tahmin edilmektedir[2].

İkinci nesil amonyak sentezi, yeşil hidrojen ile havadan ayrılan azotun Haber-Bosch prosesi ile elde edilmesine dayanmaktadır. Güneş, rüzgar ve gelgit enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yenilenebilir elektrik suyun elektrolizinde kullanılarak yeşil hidrojen elde edilmektedir. Havadan ayrılan azot ile yeşil hidrojen bilinen Haber-Bosch prosesi ile

amonyağa dönüştürülmektedir. Bu şekilde üretilen amonyak, yeşil amonyak olarak adlandırılmaktadır. Haber-Bosch Prosesi katalitik bir prosestir. Amonyak üretim reaksiyonu yüksek sıcaklık ve basınçta (~500°C – 100 bar) ve ergimiş demir katalizörü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Elde edilen ham ürün, eşanjör ve soğutucudan geçirilerek amonyak sıvı formda depolanmaktadır. Enerji sektörü son zamanlarda yeşil amonyak tedariğine ilgi göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Japonya, Kore, Çin ve diğer ülkelerde yeşil amonyak teknolojileri üzerine projeler gerçekleştirilmektedir. Dünya çapında 40'tan fazla büyük ölçekli yeşil amonyak projesi hayata geçirilmiştir.

Üçüncü nesil amonyak sentezi amonyağın elektrokimyasal yöntemlerle sentezine dayanmaktadır. Elektrokatalitik, fotokatalitik, fotoelektrokatalitik ve biyokatalitik olarak çok daha ılımlı reaksiyon koşullarında amonyak sentezlemek mümkün görünmektedir. Suyun elektrolizi, azot aktivasyonu ve elektrokatalitik olarak amonyak üretimi tek bir üniteye gerçekleştirilmektedir. Bu sayede yeşil hidrojen üretiminin getirdiği maliyetler azalmakta ve doğrudan yüksek saflıkta amonyak elde edilmektedir. Elektrokatalitik ve elektrokimyasal amonyak üretim yöntemleri önemli avantajlar sunmaktadır: (i) Amonyak dönüşümü termodinamik denge ile sınırlı değildir; (ii) Elektrokatalitik üniteler özel tasarımlara ve malzemelere ihtiyaç duymamaktadır; (3) Haber-Bosch yöntemi gibi enerji yoğun bir proses değildir, kapasite değişimlerine hızlı cevap vermektedir ve devreye alma/devreden çıkarma süresi kısadır (iv) Haber-Bosch tesislerine kapasite tamamlayıcı ve/veya esnek üretim kabiliyeti sunmak için entegre edilebilir, küçük kapasitelerde kurulumları da ekonomiktir ve (v) Güneş ve rüzgar enerji kapasitesinin yüksek olduğu coğrafyalarda yenilenebilir elektrik amonyak formunda depolanabilir. Amonyak gübre üretiminde değerlendirilebilmektedir. Elektrokatalitik, fotokatalitik, fotoelektrokatalitik ve biyokatalitik olarak çok daha ılımlı reaksiyon koşullarında amonyak sentezi üzerine birçok araştırma bulunmaktadır [4].

Elektrokatalitik azot indirgeme reaksiyonu (NRR), amonyak sentezi için sürdürülebilir ve çevre dostu bir stratejidir. Bu reaksiyon için çok sayıda elektrokatalizör geliştirilmiş olmasına rağmen, katalitik aktivite, seçicilik ve Faraday veriminin artırılması için daha fazla ilerlemeye ihtiyaç bulunmaktadır. Teorik olarak, heterojen bir katalitik yüzey üzerindeki N₂, normal sıcaklık ve basınçta belirli bir potansiyel uygulanarak NH₃'e indirgenebilmektedir. Uygulamada ise, yan reaksiyonlar nedeniyle katalizör üzerinde yüksek verim ve yüksek Faraday etkinliği (FE) elde edilememektedir. Elektro-indirgeme işlemi sırasında, hidrojen oluşum reaksiyonu (HER) en önemli yan reaksiyondur. HER yan reaksiyonu nedeniyle protonlar ve elektronlar azot indirgeme reaksiyonundan (NRR) hidrojen oluşum reaksiyonuna (HER) doğru kaymaktadır ve seçicilikte azalmaya yol açmaktadır. NRR'nin seçiciliğini geliştirmek için, yan reaksiyon HER'yi etkili bir şekilde bastırmaya yönelik Ar&Ge çalışmaları yapılmalıdır. Örneğin aktif bileşenin kristal elektronik yapısını ve elektriksel iletkenliğini iyileştirmek veya N₂ dönüşümünü artırmak

üzere Ar&Ge çalışmaları önem arz etmektedir [5]. Ortam koşullarında azot adsorpsiyonu ve ayrışma kinetiği çok yavaştır, bu da elektrokimyasal azot indirgemesinde aşırı potansiyelin artmasına ve düşük azot dönüşümüne yol açmaktadır. Yukarıda belirtildiği üzere azot indirgeme reaksiyonu (NRR) ile rekabet eden hidrojen oluşum reaksiyonu (HER), oda sıcaklığı ve basıncında amonyak oluşum hızını düşürmektedir [6].

Amonyak oluşum reaksiyon mekanizması tam olarak aydınlatılamamıştır. Azotun katalitik elektrot yüzeyine moleküler olarak yada ayrışmalı (atomik) olarak bağlandığını iddia eden mekanizma önerileri bulunmaktadır. Azot molekülünün katalitik elektrot yüzeyine ayrışarak atomik olarak bağlandığı mekanizmaya göre, iki aktif yüzey azot atomu hidrojenlenerek yüzeyde oluşan NH₃ molekülleri peşi sıra yüzeyden desorbe olmaktadır [5]. Amonyak sentezi için elektrokatalitik katalizörler esas olarak asil metal katalizörleri, geçiş metali katalizörleri ve metalik olmayan karbon katalizörleri denenmektedir [7]. Katalizör seçimi ve tasarımı, azot indirgeme verimi ve reaksiyon enerji tüketiminde belirleyicidir.

Yenilenebilir elektrik üretimi (rüzgar ve güneş fotovoltaik), yenilenebilir elektrik ile suyun hidrolizi ile yeşil hidrojen eldesi ve kriyojenik olarak havadan azot eldesine dayalı olarak gerçekleştirilen Haber–Bosch Amonyak Üretim Prosesi üzerine önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bu yöntemle yenilenebilir enerjinin şebekeye arzında yaşanan dalgalanmalar, yenilenebilir elektriğin amonyak formunda depolanması ile tolere edilmektedir. Arz fazlası yenilenebilir elektrik ile üretilebilecek yeşil hidrojen, gerektiğinde yakıt hücreleri ile tekrar elektrik üretiminde değerlendirilmektedir [8].

Karbonsuz amonyak üretimi, mevcut amonyak üretimi karbondioksit emisyonlarının küresel CO₂ emisyonlarının %1,8'ini oluşturduğu göz önüne alındığında, çevresel bir zorunluluktur. Maliyet analizleri, yenilenebilir enerji ile elektrolizör kullanılarak yeşil hidrojen üzerinden Haber-Bosch prosesi ile amonyak üretim maliyetinin amonanın Pazar fiyatının üzerinde olduğunu göstermektedir. Maliyetteki en büyük pay elektrolizör yatırım maliyeti olup, ilerleyen yıllarda elektrolizör maliyetlerindeki düşüş ile birlikte yeşil amonyak üretim maliyetlerinin de ciddi olarak azalması beklenmektedir [9].

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.

Dünya genelinde yaklaşık olarak yılda 50 milyon ton hidrojen (H₂) üretilmekte ve üretilen bu hidrojenin az bir miktarı enerji ve ısı üretiminde kullanılırken büyük bir bölümü ise sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır. Dünyadaki hidrojenin %62,4'ü amonyak (NH₃) üretimi,

%24,3'ü rafineri ve %8,7'si metanol (CH₃OH) üretimi için kullanılmaktadır. Bu kadar büyük miktarda hidrojen gerekli olduğu için genellikle tüketiciler tarafından üretilmektedir. En yaygın hidrojen üretim yöntemi doğalgaz buhar reformasyonu olup, dünya hidrojen üretiminin yaklaşık %50'sini karşılamaktadır. Fakat bu teknolojinin önündeki ana engel, neden olduğu karbondioksit emisyonlarıdır [10]. Buhar-metan reformasyon prosesi üç ana kısımdan oluşmaktadır; hidrojen üretiminin gerçekleştiği reformer ünitesi, karbon monoksitin karbondioksit ve hidrojene dönüştürüldüğü su-gaz dönüşüm reaksiyon ünitesi ve yüksek saflıkta hidrojen eldesinin sağlandığı gaz saflaştırma ünitesi. Konvansiyonel bir buhar metan reformasyon sisteminin verimliliği %65-75 arasında değişmektedir. Proseste üretilen hidrojenin yaklaşık yarısı metandan kalanı ise su-gaz dönüşüm reaksiyonundan gelmektedir.

Hidrokarbonlardan düşük karbonlu hidrojen üretiminde reaksiyonlar sonucu açığa çıkan karbondioksitin tutulması ve güvenli bir şekilde yer altındaki jeolojik yataklarda yada mağaralarda depolanması gerekmektedir. Konvansiyonel buhar metan reformasyonu ile hidrojen üretiminde CO₂ tutma prosesinin maliyeti yaklaşık olarak %25–30 arasında hidrojen üretim maliyetine ek yük getirmektedir. CO₂ tutma, nakliye ve yer altına enjeksiyon için önemli bir enerji sarf edilmektedir [11].

Hidrojen üretiminde oluşan karbondioksitin hidrojenden ayrılması için uygulanmakta olan çeşitli ticari teknolojiler bulunmaktadır. Absorpsiyon, adsorpsiyon ve kriyojenik ayırma en bilinen CO₂ ayırma teknolojileridir.

SELEXOL™, RECTISOL® ve PURISOL® gibi çeşitli çözücü temelli fiziksel absorpsiyon prosesleri ticari olarak uygulanmaktadır. Ancak yüksek basınç ve soğutma yükü, yüksek yatırım ve işletme maliyetleri en büyük dezavantajlarıdır. Fiziksel adsorpsiyonda ise CO₂, moleküller arası kuvvetler tarafından tutulmakta ve desorpsiyonu için daha az enerji gerektirmektedir. Bu da maliyetin düşürülmesini sağlamaktadır. Ancak, fiziksel adsorpsiyon ile CO₂ ayırma verimi fiziksel absorpsiyonuna göre daha düşüktür. Bu nedenle kimyasal absorpsiyon uygulanmaktadır. Kimyasal absorpsiyon, düşük-orta CO₂ konsantrasyonlarda (tipik olarak %3-20 CO₂) CO₂ ayırmak için tercih edilen bir yöntemdir. Kimyasal absorpsiyon için monoetanolamin (MEA) ve dietanolamin (DEA) gibi amin bileşikleri kullanılmaktadır. Amin bileşiği, karbon dioksit ile tersinir şekilde reaksiyona girmekte ve zayıf bağlar oluşturarak suda çözünür tuzların oluşmasına neden olmaktadır. Çözücü daha sonra ısıtılarak bu bağlar kopmakta ve bu sayede amin bileşiği rejenere edilmektedir. Sentez gazında CO₂ konsantrasyonu yüksek olduğunda (tipik olarak >%50) ise, kriyojenik ayırma uygulanabilir hale gelmektedir. Ancak aşırı soğutma yükü nedeniyle enerji tüketimi çok yüksektir ve donmayı önlemek için sentez gazındaki nemin de önceden giderilmesi ek maliyet getirmektedir.

CO₂ tutma proseslerini tamamlayıcı olarak ve ultra saf hidrojen üretimi için daha ileri saflaştırma teknolojilerine de başvurmak gerekmektedir. Konvansiyonel CO₂ tutma proseslerini tamamlayıcı olarak ultra yüksek saflıkta hidrojen üretimi için basınçlı adsorpsiyon (PSA) prosesi yaygın olarak uygulanan bir teknolojidir. PSA, sıralı adsorpsiyonun gerçekleştirildiği en az iki adet adsorpsiyon kolonundan oluşmaktadır. Kolonlardan en az biri adsorpsiyon fazında iken, diğer kolon yada kolonlar rejenerasyon adımlarından geçmektedir. Adsorbent olarak aktif karbon veya amin ile graft edilmiş aktif karbon gibi CO₂'e karşı seçici adsorbentler tercih edilmektedir.

Yüksek CO₂ tutma verimliliklerine ulaşmak için, membran ayırma teknolojisi de uygun bir seçenektir. Membranlar ile gaz ayırma ve saflaştırma enerji verimlidir, proses tasarımında esneklik ve modülerlik sunmaktadır. Membran malzemelerinin geçirgenlik-seçicilik performanslarının değişimi (yüksek geçirgenlik-düşük seçicilik veya tersi) membran teknolojilerinin CO₂ ayırma performansı üzerinde belirleyicidir. Gaz ayırma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan polimerik membranlar, yüksek sıcaklık proseslerinde yapısal olarak zarar görmektedir. Bu nedenle membran teknolojisinin uygulanabilirliği, işletme sıcaklığı ile sınırlıdır. Paladyum membranlar gibi metalik membranlar yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygun ancak pahalı bir çözümdür. Teknoloji henüz yeterli ticari olgunluk seviyesinde de ulaşmamıştır.

Yukarıda verilen yöntemlerle tutulan CO₂'nin uzun süreli olarak ve ekolojik dengeye zarar vermeyecek şekilde depolanması önemlidir. Yer altındaki jeolojik formasyonlarda (boş petrol yataklarında, tuz mağaralarında veya su akiferlerinde) veya okyanusun derinliklerinde depolama, büyük ölçekte ve yaygın olarak uygulanabilen CO₂ depolama yöntemlerinden en önemlileridir. Mineral karbonasyon, CO₂'nin karbonatlar olarak bilinen kararlı mineral ürünler oluşturmak için kayalarla reaksiyona girdiği jeolojik bir süreçtir. Bazaltlar küresel olarak yaygındır ve mineral karbonasyon depolama için uygun morfolojiye ve mineralojiye sahiptir. CO₂, mineralizasyon ile mineral yapısında uzun yıllar zararsız olarak CO₂ depolanabilmektedir. Fotosentez ile doğal bitki örtüsü ve ormanlar da CO₂ tüketimine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Jeolojik formasyonlar, okyanuslar ve ormanların sırasıyla 300–3200, 1400–20 milyon ve >100 giga ton CO₂ depolama kapasitesine sahip olduğu değerlendirilmektedir. Petrol yataklarına CO₂ enjeksiyonu petrol sondaj verimini arttırmaktadır. CO₂ ile iyileştirilmiş petrol sondajı sonrasında yataklarda boşalan haznelerde CO₂ depolanmaktadır. Bu teknoloji uzun yıllardır uygulanan olgun bir teknolojidir.

CO₂, dört farklı mekanizma ile depolanmaktadır. Bu mekanizmalar, bir depolama rezervuarının gözeneklerine enjeksiyon sırasında eş zamanlı olarak meydana gelmektedir. Her bir mekanizmanın (fiziksel, kalıntı, çözünme ile hapsedme, mineralizasyon) önemi, depolama sahasının jeolojisine ve yerel oluşum koşullarına (sıvılar, basınç, sıcaklık) büyük ölçüde

bağlıdır. Fiziksel yakalama, yapısal veya stratigrafik sınırlamayı içermektedir. Yüzen, serbest fazlı CO₂, düşük geçirgenliğe sahip bir örtü kayanın altında bulunur. CO₂ bulutu rezervuardan geçerken, CO₂'nin bir kısmı kapiler kuvvetler tarafından kayaçların gözenek boşluklarında tutulur. Bu kısım 'kalıntı' yakalama olarak adlandırılır ve gözenekler arasındaki geçişler, rezervuar litolojisi ve önceden ortamda bulunan gözenek akışkan kimyası tarafından kontrol edilir. Çözünme ile hapsetme prosesinde tuzlu su ile temas eden CO₂ çözünerek bir çözelti oluşturur. CO₂'nin tuzlu suda çözünürlüğü, rezervuarın sıcaklık ve basınç koşullarına bağlıdır. CO₂'nin tuzlu su ve rezervuar litolojisi ile etkileşimi, mineralizasyon ile CO₂ tutulmasını sağlamaktadır. Enjekte edilen CO₂, kayaçlardaki minerallerle reaksiyona girerek kararlı mineral ürünlere dönüşmektedir.

Jeolojik CO₂ depolamanın bir diğer yolu da kömür madenleridir. Kömür madenlerinde damarlarda sıkışmış metan gazı bulunmaktadır. Kömür yataklarındaki damarlara CO₂ enjekte edilerek sıkışan metan yeryüzüne çıkarılıp elektrik üretiminde değerlendirilebilmektedir.

Jeolojik formasyonlarda karbondioksitin depolamanın yolaçabileceği olumsuz etkiler (petrol ve gaz rezervlerinden çevreye karbondioksit sızıntıları, kuyulara ve jeolojik formasyonlara verebileceği zarar) ve bu şekilde depolamanın güvenli ve çevresel bir depolama teknolojisi olarak kabulü üzerine kaygılar bulunmaktadır.

Antropojenik karbondioksit emisyonlarının %85'inin okyanus derinlerinde depolanabileceği değerlendirilmektedir. Fakat bu proses çok yavaş gerçekleşmektedir. Karbondioksit okyanusun yüzeye yakın seviyelerine enjekte edildiğinde tekrar atmosfere sızma olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle CO₂, okyanusun daha derin tabakalarına enjekte edilmelidir. Bu da maliyeti artırmaktadır. Bir diğer problem de büyük miktarda enjeksiyon gerçekleştiğinde deniz sularının pH dengesinin değişmesidir. Farklı bölgelere az miktarlarda enjeksiyon ile bu problemin aşılabileceği değerlendirilmektedir. Fakat farklı bölgelere enjeksiyon da maliyeti artırmaktadır.

CO₂ tutma ve depolama teknolojilerinin teknik ve çevresel zorluklarının yanı sıra ekonomik olarak da zorlu bir prosestir. Karbondioksit tutma ve depolama maliyetleri ton CO₂ başına 100\$ ile 300\$ arasında değişmektedir[12]

Karbondioksitin depolanması veya kullanımına yönelik nakliyesi için de boru hatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Karbondioksit sıkıştırılmış gaz, sıvı veya katı (kuru buz) olarak yada süper-kritik koşullarda taşınmaktadır. Boru hatlarında karbondioksiti süper-kritik koşullarda transfer etmek genelde daha elverişlidir.

Karbon yakalama, kullanma ve depolama (KYKD) teknolojisi açısından amonyak endüstrisinin, karbon yakalama teknolojisinin hali hazırda üretim sürecinin bir parçası olması nedeniyle diğer

endüstrilere karşı büyük avantajı bulunmaktadır. Mevcut hidrojen üretimi sırasında reformlama sonrasında elde edilen hidrojenin saflaştırılması için CO₂ kimyasal veya fiziksel absorpsiyon yöntemleri ile sentez gazından ayrılmaktadır. Bu nedenle bu sektörde uygulanan CO₂ yakalama yöntemleri olgun teknoloji (THS 9) seviyesindedir. Birçok amonyak üretim tesisinde tutulan CO₂'yi bir sonraki aşamada üre üretiminde değerlendirilmektedir.

Emisyon azaltımı için amonyak üretiminde yeşil hidrojen kullanılması önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Ancak bu seçenek CO₂ yakalama ve depolama sistemlerinin mevcut ve yeni tesislere uygulanması gerekliliğinden dolayı oldukça maliyetlidir. CO₂ yakalama ve depolama prosesinin entegrasyonu, amonyak üretim maliyetini yaklaşık %20-40 oranında arttırmaktadır. Amonyak sektöründe CO₂ yakalama için kimyasal ve fiziksel absorpsiyon ile kriyojenik CO₂ tutma teknolojileri genel olarak tercih edilmektedir.

Tablo 3.1. Amonyak Üretiminde CO2 Yakalama Teknolojisinin Dünya Genelinde Durumu

Teknoloji	Ortalama THS	Uygulamaları
Kimyasal Absorpsiyon (CO2'nin kısmen tutulması)	9	<p>Genellikle üre üretimine yönelik işletilen endüstriyel tesisler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Petronas Gübre; Malezya; 1999; 60 kt CO2/yıl • Hindistan Çiftçiler Gübre Kooperatifi; Hindistan; 2006;0.2 Mt CO2/yıl <p>Arttırılmış petrol sondajı (EOR) için işletilen tesisler.</p> <p>THS 9:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Koch Azot; ABD; 1982; 0.7 Mt CO2/yıl • Nutrien; ABD; 2013; 0.25 Mt CO2/yıl (kap. 0.6 Mt CO2/yıl) • PCS Azot; ABD; 2013; 0.3 Mt CO2/yıl • Sinopec; Çin; 2015; 0.1 Mt CO2/yıl <p>Geliştirilme aşamasındaki projeler:</p> <ul style="list-style-type: none"> • CF FGübre; İngiltere; erken geliştirme aşaması; 0.33 Mt CO2/yıl • Horisont Enerji; Norveç; konsept çalışma 2025'te devreye alınması planlanmaktadır. Kapasite:1 Mt NH3/yıl.
Kimyasal Absorpsiyon (CO2'nin tamamen tutulması)	8	<p>Bu alanda bilinen iki amonyak tesisi bulunmaktadır.</p> <ul style="list-style-type: none"> • GCIP; Bahreyn; 2010; 0.16 Mt CO2/yıl • Engro; Pakistan; 2010; 0.12 Mt CO2/yıl
Fiziksel Absorpsiyon (CO2'nin kısmen tutulması)	9	<p>Tutulan CO2'yi Arttırılmış petrol sondajı (EOR) için kullanan tesisler bulunmaktadır.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coffeyville Resources Nitrogen Fertilizers; ABD; 2013; 1 Mt CO2/yıl • Nutrien; Redwater, Kanada; 2020; 0.3 Mt CO2/yıl
Kriyojenik (CO2'nin tamamen tutulması)	7	<p>Pouakai NZ; Yeni Zellanda; 2024; 1 Mt CO2/yıl.</p>

Amonyak, başlıca gübre üretiminde olmak üzere patlayıcı madde yapımı, naylon, plastik, boya gibi maddelerin üretimleri, ilaç sanayi ve temizlik ürünlerinin üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Mevcuttaki kullanım alanlarına ek olarak, potansiyel bir hidrojen taşıyıcısı olarak amonyak, yüksek hidrojen içeriğine sahip sürdürülebilir bir yakıt olarak da gelecek vaat etmektedir. Mavi amonyak eldesinde gerekli olan girdilerden biri mavi hidrojendir. Mavi hidrojen, buhar-metan dönüşüm reaksiyonu ile elde edilmekte ve oluşan CO₂ için kısmen CO₂ tutma ve depolama teknolojileri uygulanmaktadır.

Günümüzde artan enerji ihtiyacına paralel olarak yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanımı, atmosferdeki sera gazının miktarının da artmasına neden olmaktadır. Küresel ısınmanın başlıca sebeplerinden olan sera gazı emisyonları içinde en büyük paya sahip emisyon karbondioksittir. En çok enerji sektörünün faaliyetleri sonucu oluşan karbondioksit gazının miktarının azaltılması, küresel ısınmanın kontrol altına alınması ve temiz enerji eldesi süreçleri için büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, temiz enerji teknolojileri ve karbon yakalama alanlarında yoğun çalışmalar yapılmakta ve yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Karbon yakalama alanında geliştirilen yeni teknolojilerin mevcut proseslere entegrasyonu, gelişmeye açık ve enerji sektöründe sürdürülebilirlik açısından kritik bir noktadır[13].

Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Mavi amonyak üretiminde kullanılan girdilerin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi
- Mavi hidrojen üretim yönteminin geliştirilmesi
- Mavi Amonyak üretim prosesine mevcut karbon yakalama teknolojilerinin entegrasyonu
- Sera gazı salımını minimize edecek yenilikçi karbon yakalama yöntemlerinin geliştirilmesi
- Küresel üretime yönelik mavi amonyak üretim yöntemlerinin geliştirilmesi
- Teknolojinin yerleştirilmesi için ihtiyaç duyulan makine/ekipman/alt yapının disiplinler arası işbirlikleri ve yerli imkanlarla geliştirilmesi

Karbon Yakalama Yöntemleri ve Yenilikçi Teknolojiler

- Absorpsiyon, adsorpsiyon ve membran teknolojileri gibi bilinen karbon yakalama teknolojilerinde de yenilikçi malzemelerinin ve mühendislik yaklaşımlarının geliştirilmesi

- Ticari olarak %80-95 verim ile uygulanan CO₂ absorpsiyon teknolojisinin işletme maliyetlerinin azaltılması ve çözücü rejenarasyonu/geri kazanımının optimizasyonuna yönelik çalışmaların yapılması
- Monoetanol amin (MEA), dietanol amin (DEA) gibi kimyasal absorpsiyonda kullanılan çözücülere alternatif olabilecek yeni nesil çözücülerin geliştirilmesi
- Absorpsiyon prosesini etkileyen gaz/çözücü oranı, CO₂ konsantrasyonu, ürün CO₂ saflığı, proses sıcaklığı ve basıncı gibi işletme parametrelerin kontrol edilerek istatistiksel proses kontrol uygulamalarının yapılması ve/veya öğrenen yeni nesil proses kontrol algoritmalarının geliştirilmesi
- Çözücü geri kazanımını için proses içi enerji talebinin azaltılmasına yönelik optimizasyonlar
- Absorpsiyon prosesinde kütle ve ısı transferi gibi taşınım olaylarında belirleyici olan difüzyon ve toplamış transfer katsayılarının artırılmasına yönelik mekanik ve kimyasal proses iyileştirmelerinin yapılması, prosesin toplam enerji tüketiminin azaltılması ve yeni geliştirilecek çözücüler ile korozif etkinin azaltılarak malzeme ömrünün ve bakım&onarım giderlerinin azaltılması
- Adsorpsiyon prosesinde ayırma performansını belirleyen adsorpsiyon ve desorpsiyon sıcaklığı, CO₂ kısmi basıncı, adsorbanın yüzey özellikleri (polarite, yüzey fonksiyonel gruplar ve yüzey bazikliği, toplam yüzey alanı, gözeneklilik vb.) üzerine malzeme geliştirme çalışmaları
- Ticari gaz ayırma proseslerinde polimerik membran teknolojileri tercih edilmekte olup, büyük ölçekte polimerik membran uygulamalarının geliştirilmesi
- Yüksek sıcaklıkta CO₂ giderimi sağlayan metalik ve seramik membranların geliştirilmesi ve/veya polimerik membranlar ile adsorban sistemlerin hibrit kullanımı
- Adsorban-membran olarak yeni malzeme keşiflerine yönelik çalışmalar. Bu çerçevede zeolitler, metal organik kafesler (MOF'lar), karbon nanotüpler (CNT'ler) ve grafen oksit (GO) gibi katkıların membran matrisinde dağıtılarak kompozit membran yapılarının geliştirilmesi. Geliştirilecek kompozit membran malzemelerin yüksek gaz geçirgenliğine ve/veya seçiciliği sahip olması, kompozit membran malzemelerinin düşük maliyetli ve kolay işlenebilir olması

Kompozit (karışım matris) membranlarının hazırlanmasında karbon esaslı nano malzemelerin (CNT'ler ve GO) kullanımı öne çıkmaktadır. Pürüzsüz bir iç yüzeye ve gaz moleküllerinin difüzyonunu kolaylaştıran bir geometriye sahip olan karbon nanotüplerin (CNT) mekanik ve termal özellikleri amaca uygun olarak geliştirebilmektedir. Grafen oksit (GO) de oksijenli fonksiyonel gruplara sahip bir diğer karbon esaslı malzemedir. Yüzey fonksiyonel grupları

sayesinde gaz adsorpsiyonunu kolaylaştırmakta ve kompozit membranların gaz çözünürlüğünü ve seçiciliğini iyileştirmektedir [14].

Tablo 3.2. Hedefin Ürünleşme/Ticarileşmesi ve Ülkemize Ekonomik Katkı Sağlaması için Ön Plana Çıkan Kritik Hususlar

<p>Test ve Sertifikasyon İhtiyaçları (Yerli sertifikasyon merkezleri, yerli test altyapıları, vb)</p>	<p>Kovuklu elyaf membranların İTÜ, ODTÜ, TÜBİTAK MAM, MEMTEK gibi kuruluşlarda laboratuvar ölçekli test ve karakterizasyonu mümkündür. Öte yandan, performans testlerine yönelik altyapıların geliştirilmesi gerekmektedir. Hali hazırda TÜBİTAK MAM savunma sanayii desteği ile kovuklu elyaf membran üretimi ile ilgili pilot ölçekte bir altyapı geliştirmektedir. Üretilen prototip ürünün ya da endüstriyel boyutlarda gerçekleştirilecek üretimde kalite kontrol ve yerli test altyapılarının hazırlanması gerekmektedir. Karakterizasyonu özel cihaz ve uzmanlık gerektiren polimerik ürünler, karakterizasyonunu gerçekleştirecek merkezlerin oluşturulması ve bu hizmetlerin özellikle tez ve proje yapan gruplara kullanım önceliği ve uygulama pratiği yaratılmalıdır.</p>
<p>Yasal / Teknik Düzenlemeler (Standartlar, mevzuatlar, patent sistemi, vb)</p>	<p>Bazı standartların internet ortamında ulusal alanda paylaşılması üretilen ürünün kalitesini artıracak ve zamandan da tasarruf sağlanmasına yardımcı olacaktır. Patent desteklerinin artırılması ve patent alma süreçlerinin kısaltılması çalışmaların hızlanmasına bilgi ve teknolojinin daha hızlı pazarlanmasına olanak sağlayacaktır. Genel anlamda yasal / teknik düzenlemeler yeterlidir.</p>
<p>Pazara Giriş Sıkıntıları (Son kullanıcıyla etkileşim, rekabet koşulları, kamu alımlarının etkisi, vb)</p>	<p>Kamu alımlarında ve ihracat girişimlerinde pozitif ayrımcılık sektörün erken güçlenmesini teşvik edip ilk etapta önemli bir destek olmakla beraber, üretilen ürünler hem ülkemizin stratejik konumu hem de uluslararası ilişkileri ile yurtdışına da kolaylıkla pazarlanabilir nitelikte olacaktır. Kovuklu elyaf membran ürününün kullanım alanı çok geniş olup, küresel olarak nitelikli ürün sayısı da oldukça fazladır. Bu sebeple ilk aşamada öz kaynakların kullanılması gerekmektedir.</p> <p>Yurtdışı pazardan malzemelerin son kullanıcıya ulaşması çeşitli işlemlerden dolayı zaman almaktadır. Hatta bazı yüksek teknoloji ürünler için mümkün olmamaktadır. Yüksek performanslı polimerlerden, poliimidin temini güçtür ve son kullanıcı beyanı gerektirmektedir. Bu zamanın azaltılması teknolojinin ve ürünlerin ortaya çıkmasında önemli rol oynayacaktır. Üretici – son kullanıcı arasında bağlantıyı çeşitli kamu kurumlarının sağlaması önerilmektedir. Bu anlamda ülkemizde proje pazarı, ürün tanıtım günleri, fuarlar için organizasyonlar düzenlenmesinin gelenek haline getirilmesine çalışılmalıdır.</p>
<p>Teşvik ve Destekler (Girişimcilik)</p>	<p>Girişimcilik aşamasından yatırım aşamasına kadar ilgili teşvik ve desteklerin sağlanması bir zorunluluktur. Ürünün üretimi</p>

<p>destekleri, pazara giriş destekleri, yatırım teşvikleri, vb)</p>	<p>açısından yatırım teşviklerinin, uluslararası pazara giriş teşviklerinin mutlaka artırılması gerekliliği söz konusudur. Gaz ayırmada kullanılacak kovuklu elyaf ürünlerin üretimi ülkemiz açısından yeni bir konu olması nedeniyle muhakkak prototiplerin üretilmesi açısından araştırma yapan kurumlara destek ve teşvik verilmesinde öncelik sağlanmalıdır.</p> <p>Öncelikli malzeme sektörüne yönelik projeler uzun vadeli yatırımlar gerektirmekte ve tesislerin ekonomik ömrü uzun olmaktadır. Bu nedenle yatırım ve işletim maliyetlerinin yüksekliği sebebiyle yazılım vb projelerine verilen desteklerin maddi olarak en az 4-5 katı ölçüsünde bütçelerle desteklenmelidir. Bu tür malzemelere yönelik yatırım teşvikleri ve projeler ürünlerin, teknolojinin ve bunlara bağlı olarak istihdamın artmasını sağlayacaktır. Üreticiye teşvik sağlanması başlangıç çalışmaları için önemli olacaktır.</p>
<p>İnsan Kaynakları (İlgili yetkinlikte kalifiye eleman, ara teknik eleman, vb.)</p>	<p>Ülkemizin sanayi yetkinliğinin yüksekliği, 2019-2020 yılında da Savunma Sanayinde olan gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda yetkin, kalifiye ve teknik eleman anlamında yeterlidir. İnsan kaynakları açısından, bor sektörünün ihtiyacını karşılayacak, kalifiye eleman yetiştirilmesi bağlamında politikalar ve destekler oluşturulabilir. Özellikle lisansüstü öğrencilerin bu alanda uzmanlaşması (ulusal veya uluslararası) sağlanmalıdır. Bu alanda doktora yapacak araştırmacılara burs ve araştırma desteği insan kaynağını artırmada önemli rol oynayacaktır.</p> <p>Üniversitelerde laboratuvar ve araştırma çalışmalarında görev alacak teknisyen ve ara kadroların oluşturulması uzun süreçler gerektirdiğinden ve uzmanların efektif olarak kullanılabilmesine yönelik planlamalar ve farklı teşvik yapıları oluşturulmalıdır. Özellikle özellikli merkezlerde polimer üretimi ve işlenmesi konusunda uzman ve teknik destek personeli yetiştirilmesi ve istihdamın sürekliliğinin sağlanması zaruriyet arz etmektedir.</p>
<p>Firmadan Kaynaklı Sebepler (Maddi sebepler, strateji değişikliği, yönetim değişikliği, vb)</p>	<p>Yatırım yapacak firmalar için iç pazar ihtiyacı yeterli olmayacaktır. Kovuklu elyaf teknolojisi düşük maliyetli işletimi kolay ve bakım masrafı düşük bir prosestir. Azot pek çok sektör açısından önemli bir inert gaz kaynağıdır ve pek çok uygulaması mevcuttur. Fakat bu ölçüde büyük bir hedef sektörü olması aynı zamanda Dünya çapında çok miktarda üreticiyi de beraberinde getirmiştir. Bu sebeple teknolojinin geliştirilmesi sırasında devlet güvencesi ile firmaların katma değer yaratmaları sağlanmalıdır. Firmaların ulusal gereksinimleri dikkate alarak spesifik ürün odaklı olmaları yerinde olacaktır. Halihazırda büyük ölçekte membran üretimi ve testi için kurum ve kuruluş bulunmasa da azotün amonyak üretimi hariç pek çok kimyasal proseste yaygın olarak kullanımı uzun dönemde önemli bir maliyet tasarrufu sağlayacaktır.</p> <p>Kovuklu elyaf ürünler ileri teknoloji sınıfına girmesi nedeniyle ülkemizde bu konuda çalışan firma sayısı yok denecek kadar</p>

	<p>azdır. Mevcut teknoloji su arıtma üzerinedir. Bu nedenle mevcut büyük ölçekli firmaların özendirilmesi ve teşvik edilmesine ihtiyaç vardır.</p> <p>Ayrıca, ara eleman açığının lise ve sonrasında kapsayan kapsamlı bir 5-6 yıllık eğitim olarak planlanması ile oldukça donanımlı bireyler yetişebilir. Kovuklu elyaf üretim metodu insana bağımlı bir operasyondur ve kalifiye personel gerektirmektedir. Lisans eğitiminde kapsamlı bir staj çalışması, lisansüstü eğitimde mümkün oldukça alanındaki Ar-Ge ve inovasyon çalışmaları ile uzmanlaşması hedeflenmelidir</p>
--	---

3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Reforming üniteleri temel olarak brülörler (yakıtın yanmasıyla büyük miktarda ısı sağlayan) ve destekli nikel katalizörü ile doldurulmuş tüpler içeren fırınlardır. Reformer tüp duvarından geçen yüksek ısı girişi ve endotermik dönüştürme reaksiyonları nedeniyle, katalizör tüpleri önemli aksel ve radyal sıcaklık gradyanlarına maruz kalır. Bu nedenle, reaktörü temsil etmek için parçacıkların içindeki difüzyon reaksiyon olayını titizlikle dikkate alan iki boyutlu bir matematiksel model kullanılmıştır[17].

Reformer tüpünde, özellikle reaktör girişine yakın, güçlü radyal sıcaklık gradyanları bulunmuştur. Bu sıcaklık farkları, radyal konum boyunca metan reaksiyon hızında önemli farklılıklara neden olur ve kötü bir şekilde kullanılan yeniden biçimlendirme tüpü merkezine yakın katalizördür. Bu nedenle, reforming tüp çapı ve katalizör aktivite dağılımı, katalizörü daha verimli kullanmak için modifiye edilmiştir[18].

Tüp çapının reformer performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır, daha küçük çaplı tüpler için tüp başına önemli ölçüde daha yüksek dönüşümler ve reaktör kapasiteleri gözlemlenmiştir. Katalizör aktivite dağılımı aynı zamanda reaktör çalışmasını da güçlü bir şekilde etkiler. Aksel ve radyal yönler boyunca yeterince dağıtılmış, farklı aktiviteye sahip iki katalizörün kullanılması, maksimum tüp duvar sıcaklığını önemli ölçüde düşürmeye ve aynı anda daha yüksek aktiviteye sahip katalizörle doldurulmuş reaktör hacim fraksiyonunu en aza indirmeye izin vermektedir[19].

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Kimya Endüstrilerinin daha yeşil, yalın ve dijital operasyonlara ve ürünlere dönüşümünün durumu ve potansiyeli değerlendirilmektedir. Endüstri 4.0 yöntemlerinin daha tutarlı bir şekilde uygulanmasını görünüşte geciktiren nedenler tartışılmaktadır[20].

Kimyasalların tüm yaşam döngüleri boyunca karbondan arındırılmasına yönelik teknolojilerin ve yöntemlerin belirlenmesi, uygulanması ve uygulanmasına yönelik endüstrinin en iyi uygulamaları açıklanmaktadır.

Her biri kendi yaklaşımına ve fayda potansiyeline sahip iki ana strateji ayırt edilir: Gişe rekorları kıran filmler için oyun değiştiriciler ve uzun kuyruklu ürünler için kademeli iyileştirmeler. Sıklıkla ihmal edilmiş olsa da tipik değerli kullanım durumları gösterilmiş ve örnek teşkil edecek şekilde kısaca tartışılmıştır.

Kimya Endüstrilerinde spesifik enerji tüketiminde 15 yıldır süregelen durgunluğun, 1990'larda tipik olarak yeniden bir düşüşe aktarılabilmesine inanıyoruz. Diğer benzer endüstrilerle karşılaştırarak, karbondan arındırma potansiyelinin önümüzdeki 10 yılda %15 olacağını tahmin ediyoruz.

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Küresel amonyak üretimi, toplam nihai enerji tüketiminin yaklaşık %2'sini (8,6 EJ) oluşturmaktadır. Bu enerji girdisinin yaklaşık %40'ı hammadde olarak (nihai amonyak ürününde hidrojenin bir kısmını sağlayan ham madde girdileri) tüketilmektedir. Geri kalanı proses enerjisi olarak, esas olarak ısı üretmek için, tüketilir. Amonyak üretiminin %70'inden fazlası doğal gaz buhar reformlama yoluyla yapılırken, geri kalan üretimin %26'sı kömür gazlaştırma, %1', sıvı yakıt kısmi oksidasyonu/buhar reformlama ve %1'in altında bir kısmı da elektroliz yoluyla yapılmaktadır. Söz konusu amonyak üretimi 170 milyar m³ doğal gaz (endüstriyel doğal gaz talebinin %20'si) ve 75 megaton kömür talebine yol açar (endüstriyel kömür talebinin %5'i).

Amonyak, kömürün enerji girdilerinde diğer sektörlerle göre çok daha küçük bir paya sahip olmasına rağmen, ağır sanayi tarafından üretilen en yoğun emisyonlu ürünlerden biridir. Bir ton amonyak üretimi başına yaklaşık 2,4 t CO₂ ile, doğrudan CO₂ emisyonları bazında, ham çelik üretiminin neredeyse iki katı ve çimentonun dört katı emisyon yoğunluğuna sahiptir.

Çin, üretimin %30'unu (ve CO₂ emisyonlarının %45'ini) oluşturan en büyük amonyak üreticisidir. Çin'i, her biri %8-10'luk bir pay ile Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Hindistan, Rusya ve Orta Doğu takip etmektedir. Amonyak toplam üretimin yaklaşık %10'una eşit bir küresel ihracat hacmine sahiptir. Amonyakın en bilinen türevi olan ürenin ise üretiminin %30'unun ticareti yapılmaktadır. Hammadde ve üretim proses enerjisinin mevcudiyeti, amonyakın nerede ve nasıl üretildiğinin önemli bir belirleyicisidir. Amerika Birleşik Devletleri, Orta Doğu ve Rusya'da düşük maliyetli doğal gaz, bu bölgelerde doğal gaza dayalı amonyak

üretimini mümkün kılmaktadır. Çin'in zengin kömür rezervleri nedeniyle amonyak üretiminin yaklaşık %85'i kömürden gerçekleştirilmektedir.

Bugün amonyak üretiminin küresel ortalama enerji yoğunluğu net bazda 41 GJ/t civarındadır. Kullanılan hammaddeye göre mevcut en iyi teknoloji enerji performansları, doğal gazla dayalı üretim için 28 GJ/t ve kömüre dayalı üretim için 36 GJ/t olarak kabul edilebilir. Saf metandan amonyak üretiminin teorik olarak minimum enerji gerekliliği ise üst ısıl değere göre 20,9 GJ/t ve net ısıl değere göre 18.6 GJ/t'dur.

Operasyonel iyileştirmeler ve amonyak üretiminde kullanılan proseslerdeki yapısal değişimler ile sürdürülebilir kalkınma senaryosunda ve 2050'ye kadar net sıfır emisyon senaryosunda 2050'ye kadar üretimin ortalama enerji yoğunluğunda yaklaşık %25'lik bir azalma sağlanabileceği öngörülmektedir.

Tablo 3.3. Enerjinin, BAT kullanan her yol için bir ton Amonyak üretimi

Table 1.2 Energy needs to produce one tonne of ammonia for each route using BAT

Production route	Energy intensity (GJ/t)						Direct CO ₂ intensity (t CO ₂ /t)
	Feedstock	Fuel	Electricity	Steam	Gross	Net	
Natural gas SMR	21.0	11.1	0.3	-4.8	32.4	27.6	1.8
Natural gas ATR	25.8	2.1	1.0	0.0	28.9	28.9	1.6
Coal gasification	18.6	15.1	3.7	-1.3	37.4	36.1	3.2
SMR with CCS	21.0	11.1	1.0	-3.1	33.1	30.0	0.1
ATR with CCS	25.8	2.1	1.5	0.0	29.4	29.4	0.1
Coal with CCS	18.6	15.1	4.9	2.6	38.6	41.2	0.2
Electrolysis	0.0	0.0	36.0	-1.6	36.0	34.4	0.0
Biomass gasification	18.6	16.5	1.4	0.0	36.5	36.5	0.0
Methane pyrolysis	40.5	0.0	8.4	-1.6	48.9	47.3	0.0

Tablo 3.3'den görüldüğü üzere elektroliz, metan pirolizi ve karbon yakalama ve depolama entegreli fosil yakıtlı (kömür, doğal gaz) amonyak üretim tesislerinde sifıra yakın emisyon ile amonyak üretimi mümkündür. Ancak bu yöntemler ile elde edilen amonyak, enerji fiyatlarına ve diğer bölgesel faktörlere bağlı olarak, geleneksel olarak üretilen amonyağın tonu başına tipik olarak %10-100 daha pahalıdır.

Toplam amonyak talebinin %2'den biraz fazlası meralara doğrudan uygulama içindir. Amonyagın çoğunluğu, azot bazlı gübreler ve endüstriyel ürünleri üretmek için diğer girdilerle tepkimeye sokulmaktadır. Üre bunların başında gelir. Üre üretimi, amonyak talebinin yaklaşık %55'ini oluşturur. Ürenin yaklaşık %75'i doğrudan gübre olarak ve %5'i üre-amonyum nitrat çözültisi üretmek için kullanılır, geri kalanı ise bir dizi endüstriyel uygulama içindir.

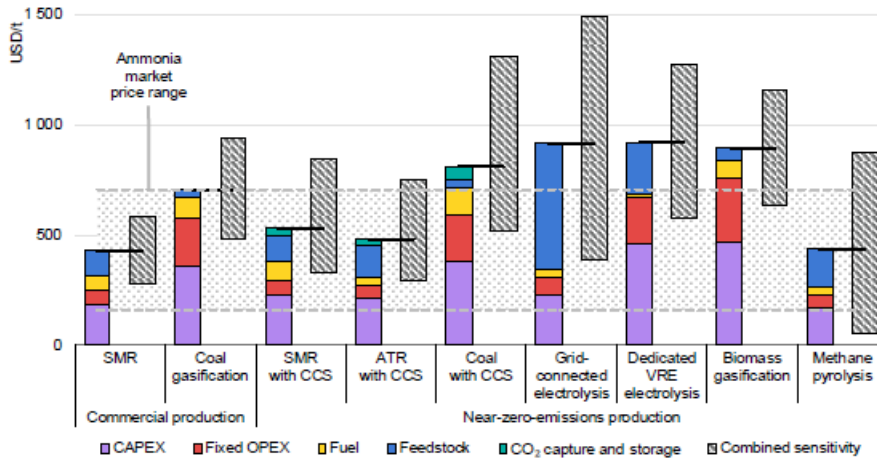
Amonyagın diğer önemli kullanımı nitrik asit ve amonyum nitrat üretimi içindir. Nitrik asidin yaklaşık %80'i amonyum nitrat üretmek için kullanılır ve bunun üçte ikisi gübre uygulamalarında kullanılır. Amonyum nitrattan mono- ve di-amonyum fosfat, amonyum sülfat

ve kalsiyum amonyum nitrat üretilmektedir. Amonyanın ve türevlerinin son kullanımlarına kadar takibi yapıldığında yaklaşık %70'inin azotlu gübre uygulamaları için ve geri kalanının ise endüstriyel uygulamalar için kullanıldığı görülmektedir.

Kömürden elde edilen amonyak üretiminin neredeyse tamamı Çin'dedir. Ülkenin amonyak üretiminin yaklaşık %85'i kömürün gazlaştırılması yoluyla yapılmaktadır. Kömür gazlaştırma ile hidrojen üretim prosesinde ilk olarak, oksijeni havadan ayırmak için bir hava ayırma ünitesi kullanılmakta ve saf azot ile saf oksijen elde edilmektedir. Gazlaştırma adımında kömür, oksijen ve su varlığında kısmen okside edilerek hidrojen, CO, CO₂, metan ve diğer hidrokarbonlardan oluşan bir sentez gazı oluşmaktadır. Gazlaştırmanın ardından sentez gazı temizleme adımı, amonyak üretiminde kullanılan katalizörlerin zehirlenmesini önlemek ve hava kirlenici emisyonları kontrol etmek için uygulanmaktadır. Son olarak CO'yu CO₂'ye ve hidrojene dönüştüren bir su gaz çift reaksiyonunu ve CO₂ giderimi ile saf hidrojen elde edilmektedir. Amonyak üretimi için biyokütle gazlaştırmada benzer bir prosestir.

Hammadde ve proses enerjisi (doğal gaz, kömür ve elektrik) için ana enerji girdilerinin fiyatları, genel üretim maliyetinin temel belirleyicileridir. Kömür gazlaştırma yolunun daha yüksek yatırım maliyeti, özellikle Çin olmak üzere belirli bölgelerde doğal gaza göre kömürün bolluğu ve düşük maliyeti ile dengelenmektedir. Enerjide arz güvenliği açısından nispeten pahalı doğal gaz ithalatını azaltmak için, Çin gibi kömür rezervleri zengin olan ülkeler amonyak üretiminde kömürü tercih etmektedir. Kömüre dayalı rotanın yaygınlığı söz konusu olduğunda etkili olan bir başka faktördür.

Figure 1.6 Simplified levelised cost of ammonia production for commercial and near-zero-emission production routes in 2020



IEA, 2021.

Şekil 3.1. 2020'de ticari ve sıfıra yakın emisyonlu üretim yolları için Amonyak üretiminin basitleştirilmiş seviyelendirilmiş maliyeti

Kömür rezervleri zengin olan ülkeler için sifıra yakın emisyonla amonyak üretmek için karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin entegre edildiği kömür gazlaştırma teknolojisi, yenilenebilir elektriğin kullanıldığı elektroliz teknolojisi ile amonyak üretiminden daha ekonomik olduğu değerlendirilmektedir. Biyokütle gazlaştırma ile amonyak üretimi için bugün faaliyette olan ticari ölçekli bir tesisin olmaması nedeniyle seviyelendirilmiş maliyet önemli ölçüde daha belirsizdir.

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda yenilikçi sifıra yakın emisyon teknolojilerinin uygulanması öngörülmektedir. Hidrojen üretimi için hammadde enerjisi kullanımından kaynaklanan CO² emisyonlarının (proses emisyonları) azaltımı için karbon yakalama ve depolama (CCS), yenilenebilir elektrik ile elektroliz prosesi ile amonyak üretimi ile karşılaştırıldığında rekabetçi bir seçenektir. Bu çerçevede 2050'de Çin'deki amonyak üretiminin yaklaşık %6'sının CCS entegreli kömür gazlaştırma tesislerinde üretilmesi hedeflenmektedir. Kömürden amonyak üretim tesislerinde karbon yakalama ve depolama (CCS) yerine karbon yakalama ve kullanımı (CCU) ile karbondioksitten üre ve metanol gibi önemli kimyasalların birlikte üretimi de önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda 2050 yılına kadar %17'si enerji üretim emisyonları ve %83'ü proses emisyonları olmak üzere toplam 200 Mt CO₂ yakalanması öngörülmektedir. Yakalanan proses emisyonlarının %65'i üre üretimi için kullanılırken ve %35'inin kalıcı olarak depolanması gerekmektedir.

Özetle; kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevlerinin üretiminde yenilikçi teknolojiler arasında karbon yakalama ve depolama (CCS), karbon yakalama ve kullanımı (CCU), proses enerji yoğunluğunu azaltmaya yönelik malzeme (katalizör, adsorbent, absorbent vb.) geliştirme ve proses iyileştirme çalışmaları bulunmaktadır. Konvansiyonel olarak uygulanan doğal gazdan amonyak üretim maliyeti 480 \$/ton mertebesinde dir. Amonyak pazarı satış fiyatı ise yaklaşık 750 \$/tondur. Karbon yakalama ve depolama uygulaması olmadan kömürden amonyak üretim maliyeti de 750 \$/ton'a yakındır. Ancak kömürden amonyak üretim prosesinin CO₂ emisyon yükü, doğal gazdan amonyak üretim prosesinin CO₂ emisyon yükünü yaklaşık iki katıdır. Bu nedenle kömürden amonyak üretiminde CO₂ emisyonlarının yakalanması ve depolanması gerekmektedir. Amonyak endüstrisi bu konuda avantajlıdır. Çünkü amonyak üretim tesislerinde sentez gazından CO₂'nun uzaklaştırılması için karbon yakalama teknolojisi halen uygulanmaktadır.

CO₂, gazlaştırma ve proses enerjisinin eldesi için yakma olmak üzere iki farklı kaynaktan gelmektedir. Proses sentez gazı CO₂ konsantrasyonu, baca gazı CO₂ konsantrasyonuna göre daha yüksek olduğu için birim CO₂ tutma için enerji sarfiyatı düşüktür. Baca gazında CO₂ tutmak için ton CO₂ başına 3.5 GJ enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle baca gazından

CO₂ gidermek, sentez gazından CO₂ giderme operasyonuna göre yaklaşık 2-4 kat daha pahalı bir işlemdir. Kömürden sıfıra yakın karbon emisyonu ile amonyak üretim prosesinin ekonomik olabilmesi için ton amonyak başına yüksek enerji tüketiminin (yaklaşık 41 GJ/t) azaltılması gerekmektedir. Bu amaçla gazlaştırma ve sentez gazı işleme proseslerinde iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu konuda yeni katalizörlerin, adsorbentlerin, ve absorbantların geliştirilmesi, gazlaştırma tasarımlarının etkin bir ısı ve kütle transferi sağlayacak şekilde iyileştirilmesi, ototermal olarak çalışan gazlaştırma sistemlerinin kullanımı gibi hususlar önem arz etmektedir.

Yakalanan CO₂'nin yaklaşık %70'i üre ve üre türevli (üre-amonyum nitrat çözeltisi) kimyasalların üretiminde değerlendirilebilmektedir. Kalan kısmın ise kalıcı bir şekilde depolanması ya da metanol gibi başka kimyasalların üretiminde kullanılması, karbon emisyonlarının kontrolü için önemlidir. Bu kapsamda yakalanan karbonun depolanması yerine değerlendirilmesinin toplam proses verimliliğini artıracığı ve maliyetleri düşüreceği değerlendirilmektedir[21].

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.

Başta doğal gaz olmak üzere hidrokarbonların buharla reforme edilmesi, birçok kimyasal ve petrokimya prosesinde ihtiyaç duyulan hidrojen ve sentez gazının üretimi için en önemli ve ekonomik prosestir. Birincil reformer, temel olarak, desteklenen bir nikel katalizörü ile paketlenmiş brülörler ve tüpler içeren bir fırındır. Prosesin güçlü endotermik doğası nedeniyle, fırın odasında yakıtın (genellikle doğal gaz) yakılmasıyla büyük miktarda ısı sağlanır. Bugün birkaç birincil reformer tasarımı mevcuttur, temel olarak boruların düzeninde ve fırın odasındaki brülörlerin konumunda farklılık gösterirler. Bu temel tasarımlar üstten ateşlemeli, alttan ateşlemeli, yandan ateşlemeli (radyant duvar) ve teras duvar tipleri olarak sınıflandırılmaktadır [22].

Dünyada ve Türkiye’de THS:7-9 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

3.1.b. Reformler ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Üretim hacmi olarak küresel kimya pazarında ilk onda yer alan amonyağın birincil tüketimi gübre üretimi üzerinedir. Ayrıca azot içeren kimyasalların üretimi için de önemli bir ara maddedir. Amonyak doğrudan alternatif yakıt veya hidrojen depolama ajanı olarak kullanımı olarak da kullanımı son yıllarda giderek artmaktadır. Elektrokimyasal olarak azot indirgeme reaksiyonu (NRR), yenilenebilir amonyağın dağıtım bölgelerinde üretimi için önemli bir alternatif teşkil etmektedir. Ancak amonyağın elektrokimyasal üretim prosesinin konvansiyonel Haber-Bosch prosesi ile rekabet edebilmesi için verimliliğinin artırılması gerekmektedir. Daha verimli bir elektrokimyasal amonyak üretimi için yeni elektrokatalizörlerin keşfine ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni elektrokatalizör keşfi için katalitik aktivite-katalitik yapı arasındaki ilişkinin aydınlatılması ve reaksiyon mekanizmasının belirlenmesine yönelik ileri analiz yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla elektrokimyasal reaksiyon gerçekleşirken katalizör yüzeyinde gerçekleşen değişimlerin anlık olarak takip edilebildiği anlık karakterizasyon (operando) tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca yenilikçi katalizörlerin keşfi için aynı anda çok sayıda katalizör bileşiminin taranmasına, elde edilen büyük verinin kısa süre yorumlanmasına ve istenen katalitik performansı verecek katalizör bileşimine karar verebilecek makine öğrenmesi & yapay zeka gibi ileri teknolojilerin uygulanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Dünyada THS:6-9 ve Türkiye’de THS:2-4 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Günlük hayatın dijitalleşmeyle dönüşüm hemen hemen her alanda görülmektedir. Küresel dijitalleşme eğilimleri, kağıt ve plastik gibi kaynakları koruyarak emisyonların azaltımına katkıda bulunmaktadır. Maliyet ve sera gazı ayak izlerini dengelemek için Kimya Endüstrilerinin daha yeşil, yalın ve dijital hale gelmesi önem arz etmektedir. Başarılı bir dijital dönüşüm için hızlı aksiyon almak gerekmektedir çünkü kimyasal ürünlerin ve üretimlerin uzun yaşam döngüleri göz önüne alındığında, uzun süreli hiçbir şey yapmama etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle yeni nesil kimyasal üretim tesis yatırımlarında karbon azaltımı etkilerinin gerçekleştirilebilmesi için yenilikler hızlı bir şekilde geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Bu kapsamda gelişen dijitalleşmeden tam olarak yararlanılmalıdır. Endüstri 4.0'ın Kimya Endüstrisindeki etkisi, küçük adımlarla ve orta vadede gözlemlenmektedir. Bununla birlikte geleneksel olarak optimize edilmiş yüksek üretim hacimli kimyasal prosesler için ezber bozan yaklaşımlar da dijitalleşme ile birlikte uygulamaya aktarılmaktadır. Kimyasal proseslerin elektrifikasyonu da bu yaklaşımlardan biridir.

Dijitalleşme sürecinde karmaşıklığın üstesinden gelmek için “Büyük Veri” analitiği kullanılmaktadır. Veri tabanlı işletim modelleri ile tahmin analitiği ve esnek ağ yapıları geliştirilmektedir. Dinamik simülasyonlar ile operatör eğitimi ve kontrol sistemi optimizasyonu için yüksek performanslı çözümler sunulmaktadır. Dijitalizasyon, kontrol sistemi optimizasyonu için elverişli bir ortam sunmaktadır. Aynı zamanda proses mühendislerine amonyak üretim prosesinin kontrolü ve işleyişi hakkında eğitim vermek için de etkin bir araçtır. Pek çok durumda amonyak tesislerinin performansı, tesis operatörü tarafından fark edilebilecek süreden daha kısa bir zaman diliminde sapabilmektedir. Bu durum öngörülemez verimsizliklere yol açmaktadır. Dijital dönüşümün bir parçası olarak dinamik simülasyon, kimyasal reaksiyonlarının gerçek zamanlı gösterimini sağlamak ve gerçek zamanlı kütle ve enerji dengelerini vermektedir. Dijital sistem üzerinden çevrimiçi takip edilebilir reaksiyon kinetiği ile

kimyasal dönüşümler kontrol edilebilmektedir. Amonyak tesisinin gerçek performansının optimize edilebilecek performans varyasyonlarını ortaya çıkarmak için çevrimiçi simülasyonlar bu nedenle önemlidir. Çevrimiçi simülasyon, üretim, işletme maliyeti, enerji tüketimi, CO₂ emisyonu ve çalışma süresi gibi tesis temel performans göstergelerini iyileştirerek operasyonların optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu konsept ile tesisin yaşayan bir dijital ikizi oluşturulmakta ve tesisin optimizasyonunu ve güvenilir olarak izlenmesini desteklemektedir.

Dünyada THS:7-9 ve Türkiye’de THS:1-4 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Kömür sentez gazından amonyak üretimi ticari olarak uygulanmaktadır ve THS9 seviyesindedir. Karbon tutma ve yakalama (CCS) teknolojileri de THS9 seviyesindedir. CCS, özellikle petrol ve gaz endüstrilerinde yıllardır ticari kullanımda olan kompleks ama kendini kanıtlanmış bir teknolojidir. Artan yatırım maliyetleri, büyük sanayi ve enerji santrallerinde CO₂ tutmak için gerekli olan yüksek enerji ve su tüketimi ve CO₂'nin uygun depolama alanlarına (tükenmiş petrol ve gaz sahaları) nakliyesi ve depolama için henüz ticari düzenlemelerin olmaması uygulamadaki ana engellerdir. Ekonomik dezavantajları dengeleyecek karbon vergileri ve teşviklerinin küresel olarak uygulanmasında görülen eksiklikler nedeniyle kömüre dayalı sentez gazından amonyak üretiminde gerekli olan CCS entegrasyonu gecikmektedir.

CCS uygulamalarının getirdiği ek maliyetlerin düşürülmesine yönelik teknolojik ilerlemeler önem arz etmektedir[26].

Dünyada THS:7-9 ve Türkiye’de THS:3-4 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar

CO₂ emisyonlarının karbon yakalama ve depolama teknolojileri ile kontrol altına alındığında amonyak üretim tesislerinde üretilen amonyak, mavi amonyak olarak adlandırılmaktadır. Kömür sentez gazından amonyak üretimi ticari olarak Çin’de gerçekleştirilmektedir. Kömürden gazlaştırma yoluyla kimyasal üretim proseslerinde CO₂ konsantrasyonu yüksek olan bir akımdan CO₂’nin yakalanması, yakma tesislerinde baca gazından CO₂ yakalama maliyetlerine oranla çok daha ekonomiktir. Bu nedenle Çin, kömürden mavi amonyak üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu doğrultuda Çin’in Karbon Yakalama, Kullanımı ve Depolama Programı’nda bugüne kadar karbon yakalama, depolama ve/veya kullanımı, depolanması (CCUS) üzerine birçok projeler tamamlanmıştır. Bu projeler demonstrasyon ölçeğinde olup, daha çok kamu kurumlarına ait işletmeler tarafından uygulanmıştır. Dünya’da sentez gazından mavi amonyak üretimine ait diğer başarılı örneklerden bazıları ise aşağıda verilmektedir:

- Norveç karbon teknoloji firması Horisont Enerji, Barents Blue Projesi ile Barents Denizi'nden gelen doğal gazla dayalı temiz amonyak için Avrupa'nın ilk büyük ölçekli üretim tesisini kurmayı hedeflemektedir. Barents Blue, Equinor ve Vår Enerji ile bir işbirliği projesi olup, EON Horisont Enerji'nin stratejik yatırımcısı ve iş ortağıdır. Tesis faaliyete geçtiğinde günde 3000 ton amonyak üretim kapasitesine sahip olacaktır. Üretim prosesinde, karbon yakalama ve Kuzey Norveç'teki Finnmark kıyılarında deniz yatağının altındaki Polaris rezervuarına kalıcı olarak depolama çalışmaları planlanmaktadır. Polaris, Norveç'in ikinci ticari CO2 depolama tesisi olmaya hazırlanmaktadır.
- Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), Mitsubishi Corporation (MC), Bandung Institute of Technology (ITB), Endonezya'da bir ulusal üniversite ve PT Panca Amara Utama (PAU) arasında temiz yakıt amonyak üretimi için karbon yakalama ve depolama (CCS) ve karbondioksit kullanımı üzerine bir işbirliği anlaşması imzalanmıştır. İşbirliğine taraf olan kurumlar, PAU'nun Luwuk, Central Sulawesi'deki amonyak tesisi ve aynı eyaletteki Donggi-Senoro LNG tesisinde mavi amonyak üretimi için karbon tutma ve yakalama (CCS) uygulaması üzerine bir fizibilite çalışması gerçekleştirecektir.
- Maire Tecnimont, ABD'de dünya çapında bir mavi amonyak tesisinin geliştirilmesi için "önde gelen bir küresel kimyasal üreticisi" ile sözleşme imzalamıştır. Değeri yaklaşık 230 milyon \$ olan tesiste günde 3.000 ton mavi amonyak üretilenmektedir. 2025 gibi erken bir tarihte tamamlanması beklenen projede Maire Tecnimont, karbon tutma ve yakalama (CCS) dahil tüm mühendislik, malzeme ve ekipmanın tedariki ile inşaat denetim sorumlu olacaktır.

3.1.b. Reformler ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Küçük ölçekli, kompakt bir hidrojen üretimi için entegre sistemin tamamında bir ölçek küçültülmesine gidilmesi gerekmektedir. Ancak ölçek küçültme sistem ısıl veriminin düşmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, entegre ve uyumlaştırılmış bir küçük ölçek hidrojen üretim teknolojisinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. İşleme verimliliğinin iyileştirilmesi ve oldukça aktif ve kararlı katalizörlerin geliştirilmesi de bu kapsamda gerekli olan unsurlardır. Yerinde hidrojen üretimi için kompakt reformer tasarımında, günlük devreye alma/devreden çıkarma, yük dalgalanmalarına hızlı tepki, katalizör kok direnci ve ısı entegrasyonu gibi büyük ölçekli endüstriyel reformerlere kıyasla yeni özellikler dikkate alınmalıdır. Yükteki değişikliklere hızlı tepkiler, reaktör tasarımı ve proses operasyonları ile sağlanabilmektedir. Ancak günlük devreye alma/devreden çıkarma frekansı, katalizör yüzeyinde kok oluşumu ve hızlı ısı transferi reformer prosesinde kullanılan katalizörler için çok kritik faktörlerdir. Bu faktörler, kompakt reformer ünitesinde katalitik aktivite ve katalizörlerin uzun vadeli stabilitesi açısından

dikkatli bir şekilde ele alınmalı ve değerlendirilmelidir. Bu kapsamda katalizör tasarımları ve katalitik membran reaktör uygulamaları önem arz etmektedir. Bu alanda Dünya'dan örnekler:

- Horizon2020 kapsamında desteklenen ve 2019 yılında tamamlanan BIONICO projesinde membran reaktörde reformer teknolojisi ile günde 100 kg hidrojen üretimi için bir pilot tesis çalışması gerçekleştirilmiştir.
- Johnson Matthey'in metal folyolar üzerine katalizör kaplamalarının yapıldığı CATACELL SSR katalizör teknolojisi, su buharı metan reformer ünitelerinde ısı transfer özEmersonellikleri, reaktif yüzey alanı ve basınç düşüşü özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. CATACELL'de kullanılan katalizör kaplama teknolojisi, geleneksel katalizör sistemlerinde kullanımı fizibil olmayan bir dizi aktif katalizör bileşeninin, stabilizasyon katkı maddelerinin ve diğer promotörlerin kullanımını mümkün kılmaktadır.

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Dünya'dan örnekler:

- Emerson, Mimic Simulation dinamik simülasyon yazılımı ile amonyak üretim tesislerine operatör eğitimi ve kontrol sistemi optimizasyonu için yüksek performanslı bir çözüm sunmaktadır. Tesisin dijital ikizinin oluşturulduğu "Digital Twin" teknolojisi ile kontrol ve işletmede dijitalleşme sağlanmaktadır.
- Günlük etkileşime sahip bir işbirliği platformu sağlayan Haldor Topsoe'nin ClearView™ yazılımı ile amonyak üretim teknolojisi lisansör firması, katalizör üreticisi ve hizmet sağlayıcısı olan Topsoe'nun yetkinliklerinden müşteri kurum maksimum fayda sağlamaktadır. Bu konsept ile tesisin yaşayan bir dijital ikizi oluşturulmakta ve tesisin optimizasyonunu ve güvenilir olarak izlenmesini desteklemektedir.

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Australian Future Energy (AFE), Avustralya'nın Queensland eyaletinde kömür gazlaştırma yoluyla İkame Doğal Gaz (SNG) üretimini hedeflemektedir. Gladstone Enerji ve Amonyak Projesi (GEAP) olarak adlandırılan kompleksin, Avustralya'nın doğu kıyısında, Queensland, Gladstone kasabası yakınlarında yer alması öngörülmektedir. GEAP konfigürasyonu, her bir gazlaştırıcıda günde 2200 kömürü işlemek için biri yedek olmak üzere üç adet gazlaştırıcıdan oluşacaktır. Komplekste toplamda günde 4400 ton kömür işleyerek günde 600 ton amonyak

ve 14 PJ/yıl SNG (41790 Nm³/h) üretilmesi planlanmaktadır (<https://kentplc.com/gladstone-energy-ammonia-project>).

2050'de Çin'deki amonyak üretiminin yaklaşık %6'sının CCS entegreli kömür gazlaştırma tesislerinde üretilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda Çin'deki enerji şirketi, önümüzdeki on yıl içinde CCS pilot projelerini hayata geçirmeye hazırlanmaktadır. Örneğin, China National Materials Group'un (Sinoma) bir yan kuruluşu olan Sinoma Energy Conservation, International, CCS Knowledge Center ile bir işbirliği anlaşmasına varmıştır. Kanadalı kuruluş, Çinli firmaya tasarım desteği sağlamayı taahhüt etmektedir. (<https://energyiceberg.com/china-ccs-hydrogen-context/>).

Amonyak üretiminde sentez gazından yüksek saflıkta hidrojen eldesi gerekmektedir. Hidrojen üretimi sırasında oldukça saf CO₂ elde edilmektedir. Bu durum amonyak üretim tesislerinde karbon yakalama'nın uygulanmakta olduğunu göstermektedir. CO₂'nin depolanması için uygun bir jeolojik depolama sahası bulunduğu takdirde depolanmasında yada petrol üretiminde kullanımında teknolojik bir zorluk bulunmamaktadır. Bu nedenle kömür sentez gazından mavi metanol üretiminin THS7-9 seviyesinde olduğu söylenebilir.

Ülkemizde de kömür gazlaştırma üzerine THS6 seviyesine ulaşıldığı değerlendirilmektedir.

Sentez gazından amonyak üretimi için kömürden hidrojen üretimi üzerine ülkemizde THS 3-4 seviyesinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Havadan azot ayırımı çalışmaları konusunda da çalışmaların THS 2-3 seviyesinde olduğu değerlendirilmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.

Karbondioksit tutma, depolama, iletim ve yer altında depolama konusunda uzmanlıklara sahip kurum ve kuruluşlar, amonyak sektöründe faaliyet gösteren Ar-Ge merkezleri, gaz ayırma malzeme teknolojileri konusunda çalışan uzman ve akademisyenler, tasarım, üretim, yazılım, uygulama, dijital ikiz ve simülasyon yapan kuruluşlar ortak bir çalışma ortaya koymalıdır.

TENMAK, TÜBİTAK ve Üniversiteler gibi kamu kurumlarının yanında ETİ Gübre, Toros Tarım, İGSAŞ gibi potansiyel paydaşların yer alacağı konsorsiyumlar oluşturulmalı ve mavi amonyak üretim teknolojisinin kazanılması ve uygulaması için pilot ve demonstrasyon ölçeğinde çalışmalar yapılmalıdır.

3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Katalizör ve yapay zeka algoritmaları konusunda çalışan kurum ve kuruluşlar, amonyak sektöründe faaliyet gösteren Ar-Ge merkezleri, katalizör ve kaplama teknolojileri ve yeni katalizör keşfinde yapay zeka uygulamaları konusunda çalışan uzman ve akademisyenler, tasarım, üretim, yazılım, uygulama ve simülasyon yapan kuruluşlar ortak bir çalışma ortaya koymalıdır.

TENMAK, TÜBİTAK ve Üniversiteler gibi kamu kurumlarının yanında ETİ Gübre, Toros Tarım, İGSAŞ gibi potansiyel paydaşların yer alacağı konsorsiyumlar oluşturulmalı ve mavi amonyak üretim teknolojisinin kazanılması ve uygulaması için pilot ve demonstrasyon ölçeğinde çalışmalar yapılmalıdır.

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Proseslerin kontrol ve otomasyonu, devreye alma ve işletimi konusunda çalışan kurum ve kuruluşlar, amonyak sektöründe faaliyet gösteren Ar-Ge merkezleri, katalitik prosesler konusunda çalışan uzman ve akademisyenler, endüstriyel kimya tesislerinin dijital ikizini oluşturma ve tesis optimizasyonu üzerine çalışan kontrol ve otomasyon firmaları ve yazılım firmaları ortak bir çalışma ortaya koymalıdır.

Amonyak üretiminin termal süreçlerinde yenilenebilir enerji kullanılması için öncelikle enerji tedarikinin 24 saat kesintisiz ve stabil olması gerekmektedir. Bunun için yenilenebilir enerji endüstrisi, elektrik enerjisi depolamak üzere, termal depolama teknolojisi üreticileri ve ilgili Ar-Ge kuruluşları ortak çalışmalıdır.

TENMAK, TÜBİTAK ve Üniversiteler gibi kamu kurumlarının yanında ETİ Gübre, Toros Tarım, İGSAŞ gibi potansiyel paydaşların yer alacağı konsorsiyumlar oluşturulmalı ve mavi amonyak üretim teknolojisinin kazanılması ve uygulaması için pilot ve demonstrasyon ölçeğinde çalışmalar yapılmalıdır.

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Kömür sentez gazından amonyak üretiminde karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin kullanımı da gerekli olduğundan kimya mühendisliği, makine mühendisliği, kontrol ve otomasyon mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, jeofizik mühendisliği ve enerji sistemleri mühendisliği branşlarından oluşan çok disiplinli bir proje ekibine ihtiyaç duyulmaktadır.

Karadeniz doğal gazını dağıtacak olan TPAO, gübre sektöründe faaliyet gösteren firmalar, mühendislik-tedarik-imalat firmaları, araştırma merkezleri ve üniversitelerin bir işbirliği mutabakatı ile bir araya geldiği konsorsiyumlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kamu kurumlarının da teşvik, yatırım ve Ar&Ge destekleri için teknoloji konsorsiyumlar ile işbirliği içinde bulunmalı önemlidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.

Güncel durumda TÜBİTAK gibi kurumların karbon yakalama ve depolama konusunda laboratuvar, pilot ve demo ölçek altyapıları mevcuttur ve özellikle kimyasal absorpsiyon teknolojisinde THS olarak 5-7 seviyesine ulaşıldığı düşünülmektedir. Kısa vadede, yapılacak Ar-Ge çalışmalarında bu seviyenin yükseltilmesi ve THS 7 seviyesine ulaşılması hedeflenmelidir. Sonrasında ise THS 9 seviyesinde endüstriyel uygulamaya geçilmesi gerekmektedir.

CO₂ yakalama özelinde düşünüldüğünde CO₂ yakalama teknolojisi birçok sektörün ortak konusu olduğu için genel konsorsiyumlar oluşturularak ilerleyebilecektir. Amonyak üretimi özelinde olan projeler ise yukarıda bahsi geçen kamu kurumları tarafından oluşturulacak özel çağrılar ve özel sektörün katkıları ile desteklenmelidir.

3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Bahsi geçen teknolojilerle ilgili entegrasyona yönelik teknik gereklilikler tespit edilmeli, teknoloji kilometre taşları belirlenmeli, her bir teknik bariyer için hibe destekli akademi – sanayi iş birliği proje çağrıları açılmalı, gerçekçi, uygulanabilir ve sürdürülebilir endüstriyel çözümler ortaya koyan projeler desteklenmeli, pilot tesis çalışmaları ile Ar-Ge çalışmaları doğrulanmalıdır. Pilot tesisler akademisyen ve sektör temsilcilerinden oluşan heyetler ile incelenmeli ve teknolojinin verimliliği kanıtlanmalıdır. Elde edilen teknoloji ve teknikler devlet- özel sektör işbirlikleriyle yerli üretime geçirilerek millileştirilmelidir. Ar-Ge çalışmaları işbirliği projeleri ile desteklenmelidir.

Millileştirilen teknolojilerin amonyak sektöründe uygulanması için fabrikalara hibe, finansal destek ve vergi iadesi gibi teşvikler sağlanarak uygulamaların yaygınlaştırılması ve bu alanda ilerleme kaydetmiş diğer ülkelere karşı rekabetçi bir ortam sağlanmalıdır.

İlgili teknoloji ve tekniklerin geliştirilmesiyle ilgili üniversitelerle iş birliği yapılarak lisansüstü ve doktora seviyesinde araştırmalar teşvik edilmeli, ilgili fakültelerin ders programlarına bu

alanlarda seçmeli lisans dersleri eklenmelidir. Bu sayede ihtiyaç duyulan bu teknolojiler üzerine geniş çaplı bir farkındalık oluşturulmalıdır.

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Bahsi geçen teknolojilerle ilgili entegrasyona yönelik teknik gereklilikler tespit edilmeli, teknoloji kilometre taşları belirlenmeli, her bir teknik bariyer için hibe destekli akademi – sanayi iş birliği proje çağruları açılmalı, gerçekçi, uygulanabilir ve sürdürülebilir endüstriyel çözümler ortaya koyan projeler desteklenmeli, pilot tesis çalışmaları ile Ar&Ge çalışmaları doğrulanmalıdır. Pilot tesisler akademisyen ve sektör temsilcilerinden oluşan heyetler ile incelenmeli ve teknolojinin verimliliği kanıtlanmalıdır. Elde edilen teknoloji ve teknikler devlet-özel sektör işbirlikleriyle yerli üretime geçirilerek millileştirilmelidir. Ar-Ge çalışmaları işbirliği projeleri ile desteklenmelidir.

Millileştirilen teknolojilerin amonyak sektöründe uygulanması için fabrikalara hibe, finansal destek ve vergi iadesi gibi teşvikler sağlanarak uygulamaların yaygınlaştırılması ve bu alanda ilerleme kaydetmiş diğer ülkelere karşı rekabetçi bir ortam sağlanmalıdır.

İlgili teknoloji ve tekniklerin geliştirilmesiyle ilgili üniversitelerle iş birliği yapılarak lisansüstü ve doktora seviyesinde araştırmalar teşvik edilmeli, ilgili fakültelerin ders programlarına bu alanlarda seçmeli lisans dersleri eklenmelidir. Bu sayede ihtiyaç duyulan bu teknolojiler üzerine geniş çaplı bir farkındalık oluşturulmalıdır.

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Pilot ölçek ve demonstrasyon projeleri gerçekleştirilmelidir. Amonyak üreticileri ile CO₂ kullanan sektör arasında bir işbirliği ağı kurulmalıdır. CO₂'nun yer altında depolanması üzerine ülkemizin potansiyelinin belirlenmesi ve CO₂ depolamanın uygulanabilirliği konusunda fizibilite ve saha analizleri çalışmalarına hız verilmelidir. Yer altında CO₂ gibi hidrojen ve metan da depolanabildiğinden, farklı gazların yer altında depolanması üzerine eşgüdümlü bir çalışma platformunun kurulmasının çalışmaları hızlandıracağı değerlendirilmektedir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

3.1.a. Geleneksel amonyak üretiminde sera gazı minimizasyonuna yönelik karbon dioksit yakalama ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi ve entegrasyonuna ilişkin çalışmalar.

2025: Mevcut durumda THS=5-7 seviyesinde olduğu değerlendirilen CO2 yakalama teknolojilerinin enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda demosntrasyon ölçeğinde uygulanabilmesi için THS>7 seviyesine çıkılması, 20 Milyon Dolar

2030; Endüstriyel uygulama CO2 teknolojilerini THS>9 seviyesine getirilmesi, öngörülen CO2 bertaraf maliyeti 60 \$/ton CO2, 100 Milyon Dolar ve üstü

Fosil hammadde girdili amonyak üretim tesislerinin en az %30'unda CO2 yakalama teknolojilerinin uygulanması. 300 Milyon Dolar

2050; Fosil hammadde girdili amonyak üretim tesislerinin en az %70'inde CO2 yakalama teknolojilerinin uygulanması. 500 Milyon Dolar

3.1.b. Reformer ünitesinde kullanılmak üzere iyileştirilmiş katalizör tasarımları

Yeni katalizör keşfi, katalizör kaplama teknolojileri, yapay zeka uygulamalarının katalizör keşfi çalışmalarına entegrasyonu, yenilikçi katalizör sübstratlarının ve geometrilerinin geliştirilmesi, laboratuvar, pilot ve endüstriyel ölçek gösterimler

Kısa vade, 2-3 yıl ve 2 milyon dolar bütçe

Orta Vade, 4-6 yıl ve 5-10 milyon dolar bütçe

Uzun vade, 6-10 yıl ve 30-40 milyon dolar bütçe

3.1.c. Geleneksel amonyak üretiminde optimizasyona yönelik olarak tüm prosesin dijitalleşmesi

Mevcut amonyak üretim tesislerinin dijitalizasyonu üzerine teknoloji gösterim saha çalışmaları

Kısa vade, 2-3 yıl ve 1 milyon dolar bütçe/tesis.

3.1.d. Kömür sentez gazından amonyak ve başta üre olmak üzere amonyak türevleri üretiminde yenilikçi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Pilot tesisler ve fizibilite çalışmaları için: 2-4 yıl

Demonstrasyon tesisleri için: 4-6 yıl

Ülkemizin yer altında CO2 depolama potansiyelinin belirlenmesine yönelik fizibilite çalışmaları

CO2'nun üretildiği kaynaktan depolama sahasına taşınması için gerekli olan iletim hatlarının tasarımına yönelik teknolojiler

Düşük ve orta kalorili kömürden amonyak üretimine yönelik malzeme teknolojileri ve proseslerin geliştirilmesine yönelik pilot ölçek çalışmalar

Kömür sentez gazından mavi amonyak üretimine yönelik demonstrasyon projeleri

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Hedeflenen teknoloji ve tekniklere sahip olunması konusunda akademi – sanayi iş birliğinin devlet teşviki ile sağlanması, bu iş birliklerinin mevcut proje ve teşvik programlarından ayrı olarak yeni bir program çerçevesinde oluşturulması gerekmektedir. Kurulacak iş birliklerinin ve ortaya konulan projenin yasal güvenceyle korunması, bağımsız teknik ve finansal heyetler tarafından denetlenmesi, proje çalışmalarına ait her türlü verinin güvenli veri tabanlarında depolanması önem arz etmektedir.

Teknolojilerin gelişmesini sağlayacak en önemli unsurlardan biri endüstriyel kullanım esnasında toplanacak verilerdir. Veri toplayabilmek için teknolojilerin uygulamaya geçirilebilmesi ve yaygınlaştırılabilmesi yönünde ilgili bakanlıkların ve özel sektör temsilcilerinin bir araya gelerek yeni iş modellerinin oluşturulması önem arz etmektedir. Bu teknolojiler için farkındalık yaratmak üzere hem üniversite hem de sektörel olarak eğitim programları oluşturulmalıdır. Ticarileştirilen proje çıktılarının maddi teşvikler sağlanarak sektörde kullanımının yaygınlaştırılması gerekmekte; ilgili teknolojinin ilk kullanıcıları olacak tesisler ile geri bildirim ve veri toplanması konusunda özel anlaşmalar yapılmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelere herhangi bir engel teşkil etmemesine rağmen yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması için revizyonlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Öncelikle ilgili teknoloji ve tekniklerin milli olarak elde edileceği projelerin ortaya konulabilmesi için, mevzuattaki mevcut programlardan farklı üniversite – sanayi iş birliği teşvik programları oluşturulmalı, proje değerlendirme ve izleme süreçleri daha kapsamlı olacak şekilde ilgili bakanlık gözetiminde yürütülmelidir. Kurulacak iş birliklerinde fikri mülkiyet haklarının korunması için konsorsiyum anlaşmaları yapılmalıdır.

Mevcut teknolojilerini milli olarak üretilecek yerli teknolojilerle değiştirmek isteyen kuruluşlar için teşvik mevzuatlarında gerekli düzenlemeler yapılarak bu değişimi hızlandıracak maddi destek sağlanmalı, değişim ile emisyonlarını azaltan kuruluşlara çevre mevzuatı kapsamında desteklenmelidir.

Yeni teknolojiler ile emisyonların azaltılması konusunda sektörlere kademeli hedefler konularak, ilerleme takip edilmelidir.

Ülkemizde tesislerin karbon ayak izinin ölçülmesi, tesislerin sertifikalandırılması ve tesis karbon ayak izi takibi konusunda da yasal mevzuatların oluşturulmasının fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Teknik Altyapılar

Pilot ve endüstriyel ölçekli çalışmalara organize sanayi bölgeleri ve KOSGEB'in katkısı ile küçük sanayici ve KOBİ'lerin de katılımının sağlanması, hedefe yönelik çözümler için ortaklıkların kurulması, platforma üye paydaşların sahip olduğu alt yapıların ortak kullanımı

İnsan Kaynakları

Bu alanda çalışan Ar-Ge personel sayısının artırılması ve hedef teknoloji için planlanan çalışmanın içeriğine göre ihtiyaç duyulması halinde özel desteklerle ilgili alanda yurt dışında çalışmakta olan kendini kanıtlamış araştırmacı veya personelin mevcut çalışmalara dahil edilmesi gerekmektedir.

Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.
3.2. Yeşil Amonyak üretimi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 3.2.a. Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi**
- 3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi**
- 3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi**

Kritik Ürün/Teknoloji 3.2.

3.2.Yeşil Amonyak üretimi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

3.2.a.Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Azot gazı kimya endüstrisinin temel taşıdır. İnert bir gaz olduğu için azot çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalar kimyasal üretim, işleme, nakliye, gıda endüstrisi, yakıt tankı inertleme gibi geniş bir alanı kapsamaktadır. Düşük reaktivitesi nedeniyle azot, değerli ürünleri zararlı kirleticilerden korumak için kullanılabilen mükemmel bir örtücü ve arındırıcı gazdır. Ayrıca yanıcı bileşiklerin güvenli bir şekilde saklanmasını ve kullanılmasını sağlar ve yanıcı toz patlamalarının önlenmesine yardımcı olabilir. Kimyasal proses endüstrilerinde azotun yaygın ve artan kullanımı nedeniyle, endüstriyel gaz şirketleri, azot üretim ve tedarik yöntemlerini daha verimli, uygun maliyetli ve kimyasal süreçleri uygun hale getirmek için sürekli olarak geliştirmektedir.

Azot genel olarak üç farklı işleme elde edilir:

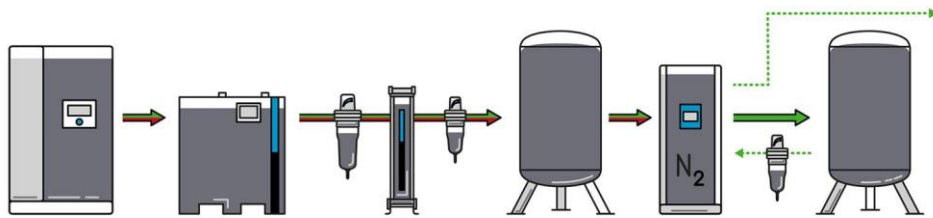
- 1)Hava Ayrıştırma (ASU),
- 2)Basınç Salımlı Adsorpsiyon (PSA)
- 3)Hollow Fiber Membran Teknolojisi.

Hava Ayrıştırma Yöntemi: Kriyojenik ya da hava ayrıştırma tesisi olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi hava içindeki azot (%78,09), oksijen (20,95%) ve argon (0,93%) gazların kaynama noktalarına kadar soğutulması ve bu vesile ile sıvı fazda ayrıştırılarak yüksek saflıkta sunulmasına dayanmaktadır. Bu yöntemle yüksek saflıkta azot elde edilebilir. Bilinen en eski metot olmasına rağmen kurulum ve işletim maliyeti açısından oldukça yüksektir. Ayrıca yerinde kriyojenik tesislerle ilişkili nispeten yüksek sermaye ve güç maliyetleri nedeniyle, daha küçük hacimli kullanıcılar genellikle vakum yalıtımlı kamyonlar tarafından sağlanan sıvı azot tedarikiyle sınırlı kalmaktadır.

Bu sebeple, 1980'lerde yerinde gaz halinde azot üretiminin alternatif yöntemleri olan basınç salımlı adsorpsiyon ve membran ayırma gibi yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Başlangıçta bu teknikler yalnızca küçük hacimli, düşük saflıktaki uygulamalar için olmakta iken,

günümüzde basınç salınımlı ve membran sistemleri, çeşitli hacimler, saflık gereksinimleri ve kullanım şekilleri için verimli bir azot tedarik yöntemi olarak öne çıkmaya başlamıştır.

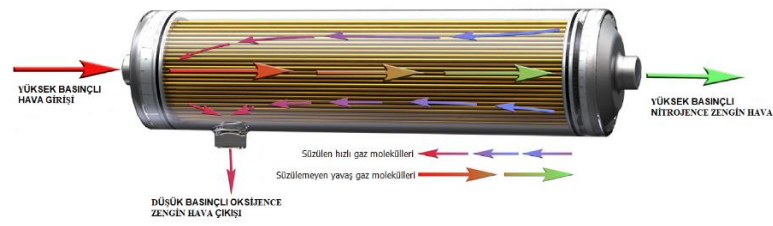
Basınç Salınımlı Adsorpsiyon (Pressure Swing Adsorption, PSA) Yöntemi: Azot jeneratörü, bulunduğu yerde havanın içindeki azotun ayrılması ile ihtiyaca uygun miktar, basınç ve saflık azot üreten sistemlerdir. PSA Azot Jeneratör Sistemleri, çalıştıkları sahada basınçlı havadan gaz halinde azot üretir ve tüpler veya kriyojenik sıvı gibi geleneksel azot gazı kaynaklarına kıyasla uygun maliyetli, sürekli ve emniyetli bir alternatif sunmaktadır. Bir proseste azot üretilirken ulaşılmak istenen saflık seviyesini bilmek ve anlamak önemlidir. Lastik şişirme ve yangın önleme gibi bazı uygulamalar düşük saflık seviyeleri (%90 ila %99) gerektirirken, gıda ve içecek sektöründeki uygulamalar veya plastik kalıplama gibi diğer uygulamalar yüksek saflık seviyesine (%97 ila %99,999) gerek duymaktadırlar. Bu durumlarda PSA teknolojisi, en ideal ve kolay yöntemdir. Azot jeneratörleri esas itibariyle, azot moleküllerini basınçlı hava içindeki oksijen moleküllerinden ayırarak çalışır. Basınç Salınımlı Adsorpsiyon bu işlemi, basınçlı hava akışındaki oksijeni adsorpsiyon aracılığıyla hapsederek gerçekleştirir. Adsorpsiyon, moleküller bir adsorban maddeye bağlanırken meydana gelir. Bu durumda ise oksijen molekülleri karbon moleküllü süzgece (Carbon Molecular Sieve, CMS) yapışırlar. Bu işlem, her biri CMS ile doldurulmuş olan ve ayırma işlemi ile rejenerasyon işlemi arasında geçiş yapılmasını sağlayan iki ayrı basınçlı tankta gerçekleşir. Ancak giriş havasıyla ilgili bazı genel gereklilikler mevcuttur. Basınçlı havanın azot jeneratörüne girmeden önce temiz ve kuru olması gerekir çünkü bu, azot kalitesini olumlu yönde etkiler ve ayrıca CMS'nin nem sebebiyle hasar görmesini önler. Ayrıca, giriş sıcaklığının 10 ile 25 °C arasında kontrol edilmesi ve basıncın ise 4 ile 13 bar arasında tutulması gerekir. Havanın doğru şekilde şartlandırılması için kompresör ve jeneratör arasında bir kurutucu bulunması gerekir. Giriş havası bir yağlı kompresörle üretiliyorsa basınçlı hava azot jeneratörüne ulaşmadan önce yabancı maddeleri atmak için bir birleşik yağ ve karbon filtresinin kullanılması gerekir. Çoğu jeneratörde kirli havanın PSA sistemine girerek bileşenlerine hasar vermesini önlemek amacıyla tedbir olarak basınç, sıcaklık ve basınç çığırma noktası sensörleri bulunur [27].



Şekil 3.2. Basınç Salınımlı Adsorpsiyon yöntemi

- 1) Membran Teknolojisi: Seçici geçirgenlik prensibine dayanır. Her bir membran modülü binlerce fiber içerir. Sıkıştırılmış hava hollow fiber membran girişine beslenir ve hızlı olan

molekül azot içi boş liflerin içinden karşı uca doğru akar. Moleküller geçirgenliklerine göre liflerin duvarlarından geçerler: Oksijen, karbondioksit ve su buharı hollow fiber liflerin çeperlerinden daha hızlı geçerek süzülürler. Liflerden geçen her molekül, içi boş lif membranında çözünme, yayılma ve çözünme yeteneğinin bir fonksiyonu olan karakteristik bir geçirgenlik hızına sahiptir. Geçirgenlik oranı, zardaki çözünürlük ve yayılma oranlarının bir fonksiyonudur. Diğer üretim metotlarına alternatif yeni bir tekniktir. Modüler tasarımlar sayesinde kurulum ve işletim maliyeti düşüktür. Membran sistemleri, 25 ve 12.000 Nm³/sa aralığındaki azot akış hızları için tasarlanabilir. Azot saflığı tipik olarak %95-97 aralığında değişmektedir ve %99,9'a varan yüksek saflıkta azot üretimi mümkündür.

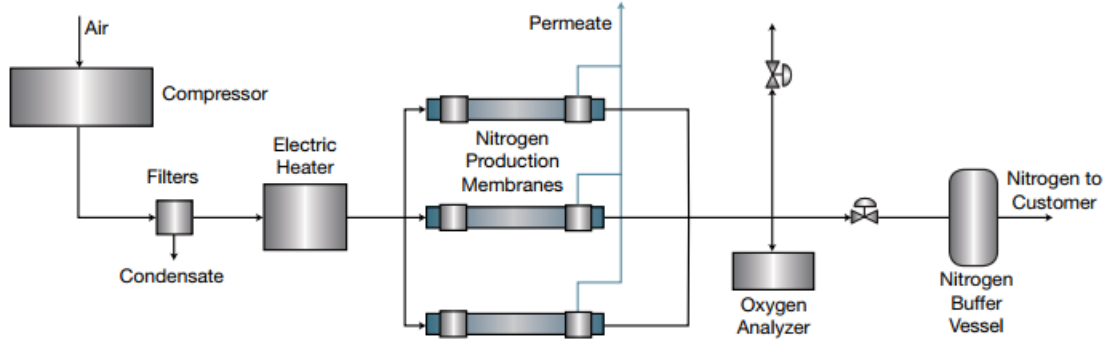


Şekil 3.3. Seçici geçirgen Membran filtre hollow fiber liflerin

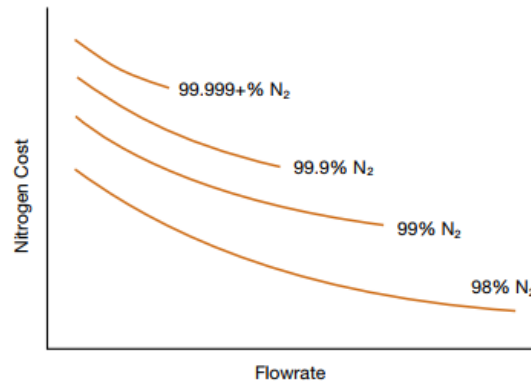


Şekil 3.4. Seçici geçirgen Membran filtre teknolojisi

Basınç salınımlı adsorpsiyon veya membran sistemleri gibi sahada işletilen azot jeneratörleri, özellikle son derece yüksek bir saflıkta azot gerekmediğinde (99,9999%) geleneksel kriyojenik damıtma veya depolanmış sıvı azota göre daha uygun maliyetlidir. Ürün saflığı, besleme saflığına, mevcut kısmi basınca ve istenen geri kazanım seviyesine bağlıdır.



Şekil 3.5. Basınç salınlı adsorpsiyon esaslı azot jeneratörü



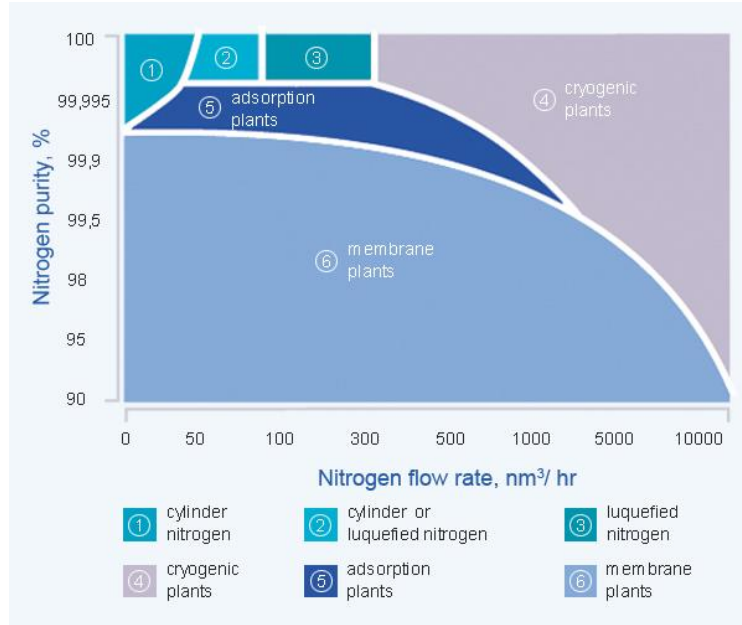
Şekil 3.6. Basınç salınlı adsorpsiyon esaslı Azot jeneratörü üretim kapasitesi

Azot saflığı ve akış hızı gereksinimleri azot maliyetini doğrudan etkilemektedir. Daha yüksek saflığın bedeli daha yüksek maliyet olarak sonuçlanmaktadır, ancak daha yüksek akış hızı genellikle azotun birim maliyetini düşürür. Maksimum tasarruf için uygulamanın gerektirdiğinden daha yüksek bir azot saflığı kullanılmamalıdır. Membran prosesleri hareketli parça içermediği için basit ve maliyet etkilidir. Membran ayırma sisteminin tasarımında birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlardan en önemli üçü bunlar itici güç veya kısmi basınç farkı, zar boyunca, gazların zara maruz kaldığı süre ve zar alanıdır.

Tablo 3.4 Azot üretim kapasitesi açısından PSA ve Membran sistemleri karşılaştırması

	PSA	MEMBRAN
Ulaşılabilir Saflık	Verimli Olarak %99,999'a Kadar	Verimli Olarak %99,999'a Kadar
Verimlilik	Daha Yüksek	Yüksek
Performans-Sıcaklık	Yüksek Sıcaklıkta Daha Düşük	Yüksek Sıcaklıkta Daha Düşük
Sistemin Karmaşıklığı	Orta	Düşük

Kullanım Yoğunluğu	Düşük	Çok Düşük
Basınç Stabilitesi	Dalgalanmalı Giriş/Çıkış	Stabil
Akış Stabilitesi	Dalgalanmalı Giriş/Çıkış	Stabil
Çalıştırma Hızı	Dakika/Saat	Saniye
Su Buhar Hassasiyeti	Pdp Maks. 8°C	Sıvı Suya İzin Verilmez
Yağ Hassasiyeti	İzin Verilmez (<0,01 mg/m ³)	İzin Verilmez (<0,01 Mg/M ³)
Gürültü Seviyesi	Yüksek (Blow-Off Sırasında Ani Artış)	Çok Düşük
Ağırlık	Orta	Düşük



Şekil 3.7. Azot üretim kapasitesine göre sistem karşılaştırması

Yenilikçi Yönler, Performans Kriterleri ve Teknik Metrikleri:

1.1. Adsorban ve Membran esaslı malzemeler

- Membran üretiminde kullanılacak yüksek performanslı polimerlerin geliştirilmesi
- Kitlesel üretime yönelik adsorbent ve membran esaslı malzemelerin ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi
- Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentler ve membranlar ile ilgili proseslerin geliştirilmesi

Membran malzemeler:

- Kullanılacak hollow fiberlerin N_2/O_2 ayırma seçiciliğinin en az 5 olması gerekir, proses çalıştırma maliyetini azalmak için 7 olması hedeflenmektedir.
- Kullanılan polimer yüksek seçicilik gösterirken düşük geçirgenlik göstermemelidir.
- Kullanım alanına uygun debi ve oksijen saflığını sağlayabilmelidir.
- Kullanılan membran mekanik olarak mukavim olmalı, germe çekme testlerinde kopma değeri yüksek olmalıdır.
- Membranın geçirgenliği membranın et kalınlığı düştükçe artmaktadır, fakat mekanik mukavemeti ve ömrü inceldikçe artmaktadır. Bu sebeple prosese göre kalınlık optimizasyonu yapılmalıdır.
- Seçilecek polimerik malzemenin yüksek performanslı olması sıcaklık ve basınca dayanması gerekmektedir.
- Gaz ayırma özelliği göstermesi için, hollow fiberler üzerine sızdırmazlığı sağlayacak şekilde ince ve geçirgen bir kaplama yapılmalıdır.

Son şekillendirilmiş hollow fiber modülü şeklinde ürün:

- Hollow fiber membran modülü en az 10 bar basınca dayanım gösterecek şekilde et kalınlığına sahip olmalıdır.
- Modül yapımı sırasında fiberlerin zarar görmemesi
- Membran modülünün sızdırmazlığı için kullanılacak sert epoksi reçinenin kırılma dayanımı özelliği çok yüksek olmamalıdır.
- Modül sarım tekniğinin yüksek geçirgenlik ve saflık sağlamaya elverişli ve paketlenilebilirliğinin yüksek olması gerekmektedir.
- Modül içerisinde kullanılacak sızdırmazlık elemanlarının yüksek sıcaklık dayanımı olmalıdır.
- Modül yapımında kullanılacak metalik malzemelerin sızdırmazlığı sağlayabilecek şekilde düzgün işlenmiş olması gerekmektedir.

Membran üretiminde kullanılacak yüksek performanslı polimerlerin geliştirilmesi

- Gaz ayırmada kullanılacak membranların sıcaklık ve mekanik mukavemetinin oldukça iyi, yüksek molekül ağırlıklı ve uzun zincirli paketlenilebilirliğinin yüksek yoğun bir membran olması gereklidir. Bu sebeple gaz ayırmada kullanılacak yüksek performanslı polimerler, poliimid, polieterimid, PEEK, polisulfon, politetersulfon, polifenilen oksit vb. olarak gösterilebilir. Bu türden polimerik malzemelerin temini güç ve pahalıdır. Bu sebeple yurtiçi kitlesele üretim gereklidir.

- Yüksek saflıkta ve verimde polimer üretim yöntemlerinin geliştirilmesi.
- Yüksek miktarda üretime elverişli metotların geliştirilmesi.
- Yerli kaynakların kullanılmasıyla üretim yöntemlerinin teşvik edilmesi.
- Uygulamaya yönelik yüksek performanslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi.
- İmidizasyon reaksiyonlarının çeşitlendirilerek polimerin özelliklerinin ve yapısının geliştirilmesi.
- Polimerlere fonksiyonel grupların eklenmesi.

Kitlesel üretime yönelik adsorban ve membran esaslı malzemelerin ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi

- Hollow fiber membran modüllerinin geliştirilebilmesi için öncelikle yüksek performanslı polimerler büyük miktarlarda üretilebilmelidir.
- Hollow fiber üretiminde kullanılacak şırınga pompası, spinneret ve fiber çekim hattı yurtiçi tedarik edilebilir olmalıdır.
- Hollow fiber üretimindeki parametreler (çözelti kompozisyonu, fiber çekme hızı, banyo sıcaklığı, suya dalış mesafesi, banyo sıcaklığı ve kompozisyonu vb.) çalışılmalı ve optimizasyonu yapılmalıdır.
- İlk formülasyon hazırlığında üçlü faz eğrilerinin çıkarılıp incelenmesi
- Fiber oluşumunda suya dalış mesafesi ve buharlaşma hızının morfolojiye etkisinin değerlendirilmesi
- Polimerlerin reometre analizi
- Yüksek viskoziteye sahip polimerlerin işlenebilirliğinin geliştirilmesi
- Yüksek miktarda üretimi sağlamak üzere farklı dope ve bore akışkanı kompozisyonları geliştirilmelidir.
- Fiber üstüne kaplanacak ince geçirgen film kaplama tekniklerinin geliştirilmesi
- Polimerlerin karıştırılarak (blend) fiber üretiminde performans geliştirilmesi

Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbanlar ve membranlar ile ilgili proseslerin geliştirilmesi

Hollow fiber membran proseslerinde geliştirilecek proses beklenen debi ve saflığa göre değişmektedir. Hollow fiber modül tasarımı yapılırken modüle yerleştirilecek fiber sayısı, fiberlerin polimerden gelen karakteristiği ve modülün boyutları hedeflenen ürünün hacimsel akış hızına ve saflığına bağlıdır. İnce fiberler daha geçirgen olmasına rağmen basınç dayanımları düşüktür. Bu sebeple proste kullanılacak basınçlara dayanıklı fiberler geliştirilmelidir. Ayrıca ince fiberlerin ömrü kalın fiberlere göre daha düşük olmaktadır. Membranların ömrünü etkileyen bir diğer faktör de kirleticiler ve su buharıdır. Kompresör

havası ya da basınçlı hava kaynağından gelen kirleticiler filtreden geçirilmelidir. Temelde paralel ve seri bağlı olmak üzere iki farklı modül paketi dizaynı mevcuttur. Yüksek saflık hedeflendiğinde modüller seri bağlanarak yüksek akış hızlarında dahi azot saflığı yüksek tutulabilir. Membran proseslerinin geliştirilmesindeki kritik ürün hollow fiber membranların üretiminin gerçekleştirilebilmesidir. Bu sebeple öncelikle fiberden başlayarak modülün geliştirilmesi gerekmektedir. Gaz ayırma prosesleri için seçicilik ve geçirgenlik ters orantılıdır. Proses maliyetini düşürmek üzere seçicilik artırılırken geçirgenlik de yüksek tutulmalıdır ve bu durum polimerin yapısı ile ilgilidir yüksek performanslı polimer geliştirilmesinden başlanmalıdır. Proses tasarımında yapılabilecek iyileştirmeler sınırlı kalmaktadır.

3.2.b.Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Gelişmiş hidrojen teknolojileri, sanayileşmiş dünyamızın karbondan arındırılmasına esas olarak katkıda bulunur. Büyük ölçekli hidrojen üretimi, gezegenimizin okyanuslarında bol miktarda bulunan su rezervuarını kullanmaktan fayda sağlayacaktır. Mevcut deniz suyunu tuzdan arındırma teknolojileri, yüksek enerji tüketimi, yüksek maliyet veya düşük performanstan muzdariptir. Temiz tatlı su eksikliği, ciddi küresel sonuçlarla ilişkilidir. Suyun neredeyse %98'i deniz suyu veya acı su olduğundan, tatlı suya yönelik artan talep, verimli ve etkili tuzdan arındırma teknolojilerine adanmış dünya çapında araştırma çabalarını yoğunlaştırmıştır[28].

Bugün, damıtma, ters ozmoz ve elektrodializ dahil olmak üzere bir dizi tuzdan arındırma konsepti mevcuttur. Ters ozmoz yaygın olarak kullanılan, güvenilir bir yöntemdir, ancak uygun olması için enerji tüketimi azaltılmalıdır. Son yıllarda, kapasitif deiyonizasyon ve pille tuzdan arındırma, mevcut tuzdan arındırma teknolojilerine potansiyel olarak enerji açısından verimli alternatifler olarak keşfedildi. Bununla birlikte, karbon elektrotlara dayalı kapasitif deiyonizasyon, deniz suyunu tuzdan arındıramaz çünkü karbon nanoporlar yüksek molar güçte geçirgenlik sağlayamaz. Bu, kısmen, karbon elektrotları koruyan iyon değiştirici membranlar uygulanarak aşılabilir. Tuzdan arındırma pilleri şarj uygular -sodyum-iyon pillerde veya diğer sulu pillerde bulunanlar gibi transfer malzemeleri ve iyon değiştirici membrana ihtiyaç duymadan doğrudan deniz suyunun tuzdan arındırılması için kullanılabilir. Bununla birlikte, iyon depolama mekanizması, iyon interkalasyonu veya benzeri Faradaik süreçler, daha da büyük yük transfer kapasitesine sahip elektrokimyasal süreçler arayışında hala iyileştirme için alan bırakmaktadır. Bu aynı zamanda geleneksel tuzdan arındırma pillerinin bir dizi şarj ve deşarj yarım döngüleri ile sürekli olmayan çalışma moduyla da ilgilidir[29].

Suyun iyileştirilmesi ve içme suyu üretimi için enerji verimli teknolojiler, sürdürülebilir teknolojiler için bir anahtardır. Elektrokimyasal tuzdan arındırma teknolojileri, ters ozmoz veya nanofiltrasyon gibi yerleşik yöntemlere karşı umut vaat eden alternatiflerdir. Son birkaç yılda, hidrojenle çalışan elektrokimyasal su arıtma ortaya çıktı. Bu gözden geçirme makalesi, iyon ayrımı için tuzdan arındırma yakıt hücreleri ve kapasitif-Faradaik yakıt hücreleri kavramını araştırmaktadır.

Rüzgar, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kullanılarak sürdürülebilir deniz suyunun tuzdan arındırılması artan ilgi çekmektedir. Bu yenilenebilir enerji türleri farklı biçimlerde depolanabilir ve hidrojenin düşük karbonlu bir gelecekte kritik ve kolaylaştırıcı bir role sahip olduğu düşünülür. Dünya üzerinde bol miktarda element deposu bulunan temiz ve hafif bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, elektrik üretmek için hidrojen yakıt hücrelerinde depolanacak ve daha sonra elektrokimyasal olarak dönüştürülecektir. Bu nedenle, yakıt hücresel elektrikli araçlar (FCEV'ler) için gelişmekte olan bir uygulamadır. H₂ üretimi için, özellikle proton değişim membranı (PEM) elektrolizi için bir darboğaz, yüksek oranda saf besleme suyunun mevcudiyetidir. Deniz suyu doğrudan hidrojen üretimi için kullanılabilir ve tatlı su üretilirse, bu sistem büyük bir ticari potansiyele sahip olacaktır.

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Amonyak sentetik yolla üretimi oldukça güçtür. Amonyak sentezi konusunda geçmişte oldukça zorlu çalışmalar yürütülmüştür. Günümüzde endüstriyel boyutta kullanılan amonyak sentez yöntemi Fritz Haber tarafından 1910 yılında geliştirilmiş ve ilk kez BASF tarafından 1913 yılında ticari boyutta uygulanmış ve Haber-Bosch prosesi olarak adlandırılmıştır. Haber-Bosch prosesi havadan elde edilen azot gazı ile kömür ve fosil yakıtlardan elde edilen hidrojenin 150-250 bar arasında yüksek basınç ve 350-550°C sıcaklık aralığında katkılı demir oksit katalizörler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Üretim prosesinin fosil yakıtla bağlı olması, azot gazının havadan yüksek basınç altında sıvılaştırılarak elde edilmesi, tepkime termodinamiğinin yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmesi ve yüksek yatırım maliyeti amonyak maliyeti ve karbon ayak izini arttırmaktadır. Ayrıca amonyak üretim tesislerinin yüksek kapasiteli olması taşıma-depolama ek maliyetlerini de doğurmaktadır. Günümüzde küresel enerji tüketiminin %1-2'si amonyak üretiminden kaynaklanmaktadır. Amonyak üretiminde enerji tüketimi 11,1–12,5 kWh/kg aralığına gerçekleşmektedir. Bu durum küresel ısınma ve sürdürülebilirlik sorunları dışında gübre fiyatlarını ve tarım ürünlerinin maliyetini de olumsuz etkilemektedir. NH₃ Amonyakın elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle eldesi hava ve suyun bir elektrokimyasal hücreye beslenerek açığa çıkan protonlarla azotun tepkimeye girmesi ilkesine

dayanmaktadır. Bu yöntemde azot molekülleri elektrokatalizör yüzeyinde farklı mekanizmalarla azot atomlarına dönüştürülmekte ve protonlarla tepkimeye sokulmaktadır. Bu amaçla farklı soy metal içerikli elektro katalizörler, geçiş metal içerikli katalizörler, metal içermeyen katalizörler (karbon, B₄C, C₃N₄ v.b.), proton değişim membranları ve enzimler üzerinde yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Elektrokimyasal indirgeme yönteminde mevcut performans henüz endüstriyel boyutta uygulama için yeterli değildir. Başarılı olunması halinde güneş ve rüzgar enerjisine dayalı, hammadde olarak su ve hava kullanılarak istenilen ölçekte amonyak üretimi mümkün olabilir. Amerika Enerji Bakanlığı (DOE) elektrokimyasal yöntemle amonyak üretiminin endüstriyel boyutta uygulamaya geçilebilmesi için 300 mA cm⁻² akım yoğunluğu, %90 Faraday verimi ve %60 enerji verimi hedeflerini uygulamaya koymuş ve bu alanda gerçekleştirilen Ar-Ge faaliyetlerine 2016 yılından itibaren hız vermiştir.

Elektrokimyasal amonyak üretiminde güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi ile entegre edilmiş, havadan azotun yüksek saflıkta ayrıştırılması için membranlar, suyun yüksek verimlilikle elektrolizini sağlayan PEM membran sistemleri ve bu sisteme bağlı elektrokimyasal amonyak sentezi hücrelerinden oluşan sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Teknolojinin mevcut hazırlık seviyesi 4 seviyesindedir. Türkiye'nin de üyesi bulunduğu Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2021 yılında hazırladığı yol haritasında elektrokimyasal amonyak üretiminin 2030 yılından itibaren ticarileşebileceğini öngörmektedir[30].

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

3.2.a.Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	--------------------------

Azot, esas olarak en bol kaynağı olan havadan üç işlem kullanılarak üretilir: membran, basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) ve kriyojenik damıtma. Azotun çalışma koşulları, akış hızı ve saflığı dikkate alınarak, azotun havadan ayrılması için en ekonomik teknoloji seçilebilir[31]. Elbette bazı saflık ve akış hızı değerleri için birden fazla teknoloji seçilebilir. Bu aralıklarda, sevk edilen ürün sıvısının (sıvı veya gaz halindeki) yan ürün fazının ekonomik değeri ve ürün uygulamaları gibi diğer parametreler de dikkate alınmalıdır. Basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) veya membran sistemleri gibi tesis içi azot jeneratörleri, özellikle son derece yüksek bir saflık (örn. %99,9999) gerekli değilse, geleneksel kriyojenik damıtma veya depolanmış sıvı azottan daha uygun maliyetli olabilir. Teori, prosesin genel davranışını, basınç salınımlı adsorpsiyonun (PSA) neden çok çeşitli saflık ve akış gereksinimleri için yerinde azot üretimi için uygun maliyetli bir yöntem olabileceğini ve ayrıca karbon moleküler eleklerin (CMS) adsorbanın neden en uygun olduğunu doğru bir şekilde tasvir eder. Havadan yüksek saflıkta (%99,9995) azot üretimi için.

3.2.b. Deniz suyundan desalinazyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Deniz suyu elektrolizinden hidrojen üretimi, enerji sistemimizin temiz ve sürdürülebilir gelişimi için bir temel sağlar. Bununla birlikte, mevcut deniz suyu ayırma tekniklerinde deniz tuzunun elektrolizörlere verdiği zararın üstesinden gelmek zordur. Bu çalışmada, arıtılmamış deniz suyunu ayırmak için katı oksit elektrolizi kullanılmış ve elektrokimyasal performansı ve uzun vadeli kararlılığı incelenmiştir. Elektroliz, 200 mA/cm² sabit akım yoğunluğunda 420 saat boyunca 183 mL/dak hidrojen üretimi ve %4,0 bozunma oranı ile gerçekleştirildi. Yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı yeniden kullanılmadan bile %72,47 enerji dönüşüm verimliliği elde edildi. 420 saatlik deneyden sonra, hücrenin yapısının ve bileşiminin değişmeden kaldığı bulundu, bu da uzun süreli işlemin hücrenin kendisi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını gösterdi. Bu çalışma, deniz suyu ayırmada katı oksit elektroliz hücresinin performanslarının mükemmel olduğunu ve deniz suyundan enerji depolama ve hidrojen üretimi için iyi bir seçim olduğunu göstermektedir[32].

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Elektrokimyasal yöntemle amonyak sentezi konusunda THS seviyesi Uluslararası Enerji Ajansı tarafından 3-4 olarak belirtilmektedir. Türkiye de bu konuda gerçekleştirilen bir Ar-Ge faaliyeti bilinmemektedir. Ancak elektrokimya ve uygulamaları konularında araştırmalar mevcuttur.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

3.2.a.Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Hollow fiber membranlar

Dünya Örnekleri

THS 1-5: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları

- EMI Twente (Hollanda)
- Membrane Science and Technology Cluster
- INNOMEM
- Me-Sep (Çek Cumhuriyeti)
- RWTH Aachen (Almanya)
- Fraunhofer-Gesellschaft (Almanya)
- H2SITE On-site H2 recovery & generation

THS 6-9: Prototip Geliştirme, Ürünleşme ve Ticarileşme

Adsorbanlar:

- Kuraray Co. Ltd. (Japonya)

Gaz Ayırma Membranları:

- Air Liquide (Fransa).
- Air Products (ABD)
- Honeywell, UOP (ABD)
- UBE Industries (Japonya)
- Generon (ABD)
- Evonik (Almanya)
- Grasys (Rusya)
- Eaton (ABD)
- Airrane (Güney Kore)
- Prism (ABD)
- Cobham (İsrail)
- Filatech Filament Technology u. Spinnanlagen GmbH

Türkiye Örnekleri

THS 1-5: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları

- İTÜ, Kimya Mühendisliği, Çevre Mühendisliği, MEMTEK, ODTÜ, Kimya Mühendisliği

THS 6-9: Prototip Geliştirme ve Ürünleşme

Türkiye'den TÜBİTAK MAM gibi kurum/kuruluşlar bu tip malzemelerin askeri ve sivil uygulamalara yönelik geliştirilmesi ve uygulanması açısından tecrübe sahibi firmalardır.

Ülkemizde gaz ayırmada kullanılacak hollow fiber membranların kitlesel üretiminde henüz THS 5 üzerinde pilot veya kitlesel ölçekte bir firma bulunmamaktadır.

Zenginleştirilmiş azot ve oksijen üretmek için havanın ayrılması kimya endüstrisi için büyük önem taşımaktadır. Membran bazlı gaz geçirgenliği prosesi, ekonomik, kompakt boyutlu, konfigürasyonda modüler ve düşük özgül güç tüketimi sunma kapasitesine sahip olduğu için kriyojenik damıtma, katı adsorpsiyon ve solvent absorpsiyonu gibi geleneksel yöntemlere göre önem kazanmıştır. Membranla üretilen azotun tipik uygulamaları arasında örtme, temizleme, inertleme ve dengesiz sondaj yer alırken, oksijenle zenginleştirilmiş hava esas olarak fırınlarda, yakıt hücrelerinde, tıbbi solunumda ve deniz altı solunumunda yanmayı geliştirmek için kullanılır. Hava ayrıştırımda kullanılan çoğu membran katı polimerlerden yapılır.

Zenginleştirilmiş azot ve oksijen akımlarına membran bazlı hava ayrımı, esas olarak daha düşük işletme maliyetlerine yol açan daha düşük enerji tüketimi nedeniyle, geleneksel kriyojenik hava damıtma işlemine göre gereken önemi kazanmıştır. Geleneksel adsorpsiyondan farklı olarak, membran prosesi ayrıca herhangi bir rejeneratif adım gerektirmez. Gaz ayırma için toplam membran pazarının 2020 yılına kadar 760 milyon \$'a ulaşması bekleniyor ve membranlarla hava ayırma, toplam membran gaz ayırma işinin yaklaşık 155 milyon \$'ını temsil etmektedir. Sırasıyla 3,64 Å ve 3,46 Å olan azot (N₂) ve oksijen (O₂) moleküllerinin kinetik çapları arasındaki küçük fark, boyuta dayalı basit difüzyon hızı farklılıklarıyla hava ayrılmasını çok zorlaştırır. Membran hava ayrıştırması, >%95 N₂ veya %60-80 O₂ içeren orta derecede saf akışlar üretmek için artık yaygın olarak uygun maliyetli bir süreç olarak kabul edilmektedir. Bazı tıbbi uygulamalar için %35 O₂ saflığı da çok kullanışlıdır ve elde edilmesi daha kolaydır. Uygulamaya bağlı olarak, istenen ürün saflığını elde etmek için akışlardan biri veya her ikisi daha fazla işlenebilir. Mevcut membranların tümü O₂'ye daha fazla geçirgen olduğundan, azotla zenginleştirilmiş hava (NEA) akışı esas olarak giriş besleme basıncında geri kazanılır, ancak oksijenle zenginleştirilmiş hava (OEA) akışı düşük basınçta üretilir. Hava ayrıştırması için seçici membranlar kullanmanın yararları nedeniyle, membranlardan gaz taşınması sırasında ortaya çıkan olayları anlamak ve daha iyi ayırma özelliklerine sahip yeni polimerleri sentezlemek için çaba sarf edilmektedir. Son otuz yılda, membran bazlı gaz ayırma, geleneksel ayırma tekniklerine göre daha iyi alternatifler olma potansiyelini kanıtladı. Örneğin, kriyojenik damıtma ve adsorpsiyon gibi geleneksel işlemler enerji yoğundur ve büyük sermaye yatırımları gerektirir. Membranlar, kriyojenik olarak veya basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) yoluyla üretilen N₂ ile ve ayrıca inert gaz jeneratörlerinde üretilen O₂ içermeyen gazla rekabet eder. Çoğu durumda membranlar, inert gaz üretimi için diğer teknolojilere göre bir maliyet avantajına sahiptir.

3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Enerji tasarruflu hidrojen üretimi, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak veya durgun oksijen evrimi reaksiyonunu, hala elektrik girdisine ihtiyaç duyan genel su ayrıştırmasından ayırarak elde edilebilir. Asidik hidrojen evrimi ve alkalın hidrazin oksidasyonunu iyon değişimi ile birleştiren bir elektrokimyasal nötralizasyon kimyası stratejisi aracılığıyla, talep üzerine elektrik çıkışıyla hidrojen üretimi ve suyun tuzdan arındırılması gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal nötralizasyon hücreleri, çevreden gelen kimyasal enerjinin ve düşük dereceli ısının verimli bir şekilde kullanılmasına ve m³ hidrojen başına 0,81 kWh elektrik çıkışına olanak tanımaktadır. Hücre işlevi, hücre çalışmasını bozmadan veya hücre konfigürasyonunu değiştirmeden 85,5 mW cm⁻²'ye kadar yüksek tepe güç yoğunluğu veya 70,1 mol h⁻¹ m⁻²'ye kadar yüksek oranda kendiliğinden hidrojen üretimi ile hızla elektrik çıkışına çevrilebilir. Hızlı su tuzdan arındırma, harici bir elektrik kaynağı olmaksızın 56,1 mol h⁻¹ m⁻²'lik yüksek bir tuz giderme hızında eş zamanlı olarak elde edilir.

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından karbona dayalı olmayan enerji kaynakları dönüşümü (REFUEL) kapsamında amonyağın elektrokimyasal yöntemle üretimi konusunda Anion Exchange Membrane Ammonia Production başlıklı bir proje 1.5 Milyon Dolar bütçeyle 2017-2019 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. (<https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/anion-exchange-membrane-ammonia-production>)

North Dakota Üniversitesi ve Proton OnSite firmaları tarafından 2018 tarihinde başlatılan DOE destekli bir projede demonstrasyon aşamasına gelinmiştir. <https://www.energy.gov/eere/ssl/downloads/low-pressure-electrolytic-ammonia-production>.

Proje çıktıları arasında pilot ölçekte demonstrasyon çalışmaları da bulunmaktadır.

Ayrıca Avrupa Birliği ERC kapsamında A green approach to making ammonia başlıklı bir proje 2021 yılında desteklenmeye başlamıştır <https://cordis.europa.eu/project/id/866402>

Ülkemizde bu alanda bir çalışma veya girişim bilinmemektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

3.2.a. Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Havadan yüksek saflıkta azot üretilmesi sırasında düşük enerji tüketimine sahip adsorbentlerin geliştirilmesi için proses mühendisleri, kimya mühendisleri ile malzeme mühendislerini birlikte çalışması gerekmektedir.

3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Deniz suyunun desalinasyonu ve yenilenebilir elektrik enerji kullanımı ile saf hidrojen üretimi için kimya mühendisleri ve enerji mühendislerini birlikte çalışması gerekmektedir.

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Azottan elektrokimyasal yöntem ile amonyağı üretilmesi teknolojilerinin gelişimi için kimya mühendisleri ve enerji mühendislerinin desteğine ihtiyaç duyulmaktadır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

3.2.a. Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Havadan azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin gelişiminde proses ve kimya mühendislerini ortak çalışması şeklinde en az 5 yıl süreli orta ve büyük ölçekli hibe destekli projeler esas alınmalıdır.

3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Deniz suyunun desalinasyonu ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektroliz yöntemi sonucunda saf hidrojenin üretimi, yüksek maliyetli projeler gerektirmesi nedeniyle, devlet desteğine ihtiyaç duyulan orta ve büyük ölçekli Ar-Ge projeleri geliştirilmelidir. En az 5 yıl süreli projeler esas alınmalıdır.

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemi ile amonyağın üretimi için kimya, proses, fizik ve enerji mühendislerinin dahil olduğu devlet destekli orta ve büyük ölçekli Ar-Ge projeleri geliştirilmeli ve orta uzun vade ile desteklenmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

3.2.a. Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin ve membranların geliştirilmesi

Havadan yüksek saflıkta azot eldesinde düşük enerji tüketimli adsorbentlerin geliştirilmesi için 3- 5 yıllık proje gelişimine ihtiyaç duyulmaktadır.

3.2.b. Deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Deniz suyunun kullanımı ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile elektrokimyasal yöntemle saf hidrojen üretimi için üzerinde çalışması gereken Ar-Ge projeleri minimum 3 yıllık bir zaman zarfı gerektirmektedir.

3.2.c. Azottan elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle amonyağın üretilmesi teknolojilerinin geliştirilmesi

Elektrokimyasal yöntemle amonyak üretimi henüz THS 4 seviyesindedir. Gelişmiş ülkelerde bu alanda yapılan araştırmalar 6-8 seviyesi arasında pilot ölçekte demonstrasyon çalışmaları içermektedir. Bu alanda uygulamaya yönelik bir çalışma 3-5 yıl içerisinde pilot ölçekte gerçekleştirilebilir. Ancak endüstriyel boyutta uygulanabilirliği ancak uzun vadede mümkün olabilir. Bu alanda yapılacak Ar-Ge çalışmaları THS:4-THS:6/7 seviyesinde olacağı için bugünün rakamlarıyla 3-5 milyon TL bütçeli projeler desteklenebilir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

- Mevcut mevzuatlar teknolojik ilerlemelere herhangi bir engel teşkil etmemesine rağmen yasal zorunluluklar ve teşvikler yoluyla gelişmelerin sağlanması için revizyonlara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Öncelikle ilgili teknoloji ve tekniklerin milli olarak elde edileceği projelerin ortaya konulabilmesi için, mevzuattaki mevcut programlardan farklı üniversite – sanayi iş birliği teşvik programları oluşturulmalı, proje değerlendirme ve izleme süreçleri daha kapsamlı olacak şekilde ilgili bakanlık gözetiminde yürütülmelidir. Kurulacak iş birliklerinde fikri mülkiyet haklarının korunması için konsorsiyum anlaşmaları yapılmalıdır.
- Mevcut teknolojilerini milli olarak üretilecek yerli teknolojilerle değiştirmek isteyen kuruluşlar için teşvik mevzuatlarında gerekli düzenlemeler yapılarak bu değişimi hızlandıracak maddi destek sağlanmalı, değişim ile emisyonlarını azaltan kuruluşlara çevre mevzuatı kapsamında desteklenmelidir.
- Yeni teknolojiler ile emisyonların azaltılması konusunda sektörlere kademeli hedefler konularak, ilerleme takip edilmelidir.
- Ülkemizde tesislerin karbon ayak izinin ölçülmesi, tesislerin sertifikalandırılması ve tesis karbon ayak izi takibi konusunda da yasal mevzuatların oluşturulmasının fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Teknik Altyapılar

Gerek üniversitelerde gerekse de üniversite-sanayi işbirlikli projelerde öğütme teknolojilerindeki yenilikler ve uygulanabilirlikleri üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu noktada öğütme teknolojisinin geliştirilmesi ve uygulanmasında belirli bir aşamaya geldiği bilinmektedir. Yeterli teknik altyapının oluşturulabilmesi için pilot ölçekte elde edilen çözümler endüstriye ölçeklendirilerek THS'nin yükseltilmesi gerekir. Bunun için sanayide ayrıca farkındalık çalışması yapılarak sektörün yönlendirilmesi faydalı olacaktır. Öte yandan yenilenebilir enerji üzerine de etkili çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar bulunmaktadır. Bu iki konunun, klinker üretimindeki öğütme ve kırma süreçleri için bir araya getirilebilecek düzeye geldiği düşünülmektedir. Bu doğrultuda ek yatırım ve destekler bu gelişimin önünü açacaktır. Bu noktada pilot ve endüstriyel ölçekli çalışmalara organize sanayi bölgeleri ve KOSGEB'in katkısı ile küçük sanayici ve KOBİ'lerin katılımının sağlanması, nokta atışı çözümler liyakatli ortaklıkların kurulması, bu ortaklıkların ilgili bakanlıklar ve TÜBİTAK tarafından desteklenmesi ve denetlenmesi gerekir.

İnsan Kaynakları

Gerekli insan kaynağının oluşturulabilmesi için gerek akademide gerek sanayide liyakat esaslı personel teşviki sağlanarak ilgili personelin bütün mesaisini sadece hedef teknoloji için kullanması garanti altına alınmalıdır. Bu hususta çalışması desteklenecek personelin Ar-Ge

vizyonuna sahip olması, araştırma ve çözüm üretme kabiliyeti bulunması, mevcut eğitim ve tecrübe altyapısının çalışılacak iş ile uygun olması oldukça büyük önem arz etmektedir.

Destek ve Teşvikler

Hedef teknoloji ve tekniklerin elde edilebilmesi için nitelikli Ar-Ge projelerinin tasarlanması ve çalışılması gerekir. Sanayide karşılığı olmayacak hiçbir akademik çalışma veya akademik altyapısı olmayan hiçbir sanayi uygulaması güvenilir, sürdürülebilir ve uzun soluklu olmayacaktır. Bu noktadan hareket ederek hibe teşviki sağlanan, kapsamlı değerlendirme ve denetim süreçlerine tabi tutulacak akademi – sanayi iş birliklerinin ivedilikle kurulması önem arz etmektedir. Bu işbirliklerinin kapsamı kısa, orta ve uzun vadeli olmak üzere kapsamlı bir çalışma peşinen belirlenmelidir. Hedef teknoloji için planlanan çalışmanın içeriğine göre ihtiyaç duyulması halinde özel desteklerle ilgili alanda yurt dışında çalışmakta olan kendini kanıtlamış araştırmacı veya personel ülkemize davet edilmelidir. Kurulacak destek ve teşvik mekanizmaları için ayrı bütçe oluşturulmalı ve bürokratik süreçler hızlandırılmalıdır.

Elde edilecek teknolojilerin seri üretimi için küçük sanayici ve KOBİ'lere gerekli yatırım desteği sağlanmalı, hedef tesisler bu yerli teknolojilere mevzuat ve finansal teşviklerle yönlendirilmelidir.

Hedeflenen her bir teknoloji alanında ülkemizin kendi kendine yetecek seviyeye gelmesini takiben rekabetçiliği arttırarak dünyada yeni pazarlar bulunması hedeflenmeli ve bu konuda ihracat desteklerinin sağlanması elzemdir. Bu şekilde, Yeşil Mutabakat Hedeflerinin yakalanmasının yanı sıra, ithal ürünlerin ikame edilmesi ve milli teknolojilerin ihraç edilmesi yoluyla ülkemizin ekonomisine katkı sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Reddi, K., Elgowainy, A., & Sutherland, E. (2014). Hydrogen refueling station compression and storage optimization with tube-trailer deliveries. *International journal of hydrogen energy*, 39(33), 19169-19181.
- [2] Kothari, R., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 553-563.
- [3] Makhoulfi, C., & Kezibri, N. (2021). Large-scale decomposition of green ammonia for pure hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(70), 34777-34787.
- [4] Lv, X. W., Weng, C. C., & Yuan, Z. Y. (2020). Ambient ammonia electrosynthesis: current status, challenges, and perspectives. *ChemSusChem*, 13(12), 3061-3078.

- [5] Sato, K., Imamura, K., Kawano, Y., Miyahara, S. I., Yamamoto, T., Matsumura, S., & Nagaoka, K. (2017). A low-crystalline ruthenium nano-layer supported on praseodymium oxide as an active catalyst for ammonia synthesis. *Chemical science*, 8(1), 674-679.
- [6] Xu, W., Fan, G., Chen, J., Li, J., Zhang, L., Zhu, S., ... & Chen, J. (2020). Nanoporous palladium hydride for electrocatalytic N₂ reduction under ambient conditions. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(9), 3511-3516.
- [7] Lin, S., Zhang, X., Chen, L., Zhang, Q., Ma, L., & Liu, J. (2022). A review on catalysts for electrocatalytic and photocatalytic reduction of N₂ to ammonia. *Green Chemistry*.
- [8] Frattini, D., Cinti, G., Bidini, G., Desideri, U., Cioffi, R., & Jannelli, E. (2016). A system approach in energy evaluation of different renewable energies sources integration in ammonia production plants. *Renewable Energy*, 99, 472-482.
- [9] Liu, C. M., Sandhu, N. K., McCoy, S. T., & Bergerson, J. A. (2020). A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer–Tropsch fuel production. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(6), 3129-3142.
- [10] Muradov, N. Z. (2008). Production of hydrogen from hydrocarbons. In *Hydrogen Fuel* (pp. 45-114). CRC Press.
- [11] Serban, M., Lewis, M. A., Marshall, C. L., & Doctor, R. D. (2003). Hydrogen production by direct contact pyrolysis of natural gas. *Energy & fuels*, 17(3), 705-713.
- [12] Koornneef, J., Ramírez, A., Turkenburg, W., & Faaij, A. (2012). The environmental impact and risk assessment of CO₂ capture, transport and storage—An evaluation of the knowledge base. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(1), 62-86.
- [13] Figueroa, J. D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., & Srivastava, R. D. (2008). Advances in CO₂ capture technology—the US Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International journal of greenhouse gas control*, 2(1), 9-20.
- [14] Yuan, Z., Eden, M. R., & Gani, R. (2016). Toward the development and deployment of large-scale carbon dioxide capture and conversion processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(12), 3383-3419.
- [15] Melo, F., & Morlanés, N. (2008). Study of the composition of ternary mixed oxides: Use of these materials on a hydrogen production process. *Catalysis today*, 133, 374-382.
- [16] Feron, P. H. M., & Hendriks, C. A. (2005). CO₂ capture process principles and costs. *Oil & Gas Science and Technology*, 60(3), 451-459.
- [17] Pedernera, M. N., Pina, J., Borio, D. O., & Bucala, V. (2003). Use of a heterogeneous two-dimensional model to improve the primary steam reformer performance. *Chemical Engineering Journal*, 94(1), 29-40.
- [18] Shayegan, J., Hashemi, M. Y. M., & Vakhshouri, K. (2008). Operation of an industrial steam reformer under severe condition: a simulation study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 86(4), 747-755.
- [19] Chabot, G., Guilet, R., Cognet, P., & Gourdon, C. (2015). A mathematical modeling of catalytic milli-fixed bed reactor for Fischer–Tropsch synthesis: Influence of tube diameter on Fischer Tropsch selectivity and thermal behavior. *Chemical Engineering Science*, 127, 72-83.
- [20] Chen, T. L., Kim, H., Pan, S. Y., Tseng, P. C., Lin, Y. P., & Chiang, P. C. (2020). Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable

development goals: Challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, 716, 136998.

[21] Quadrelli, E. A., Centi, G., Duplan, J. L., & Perathoner, S. (2011). Carbon dioxide recycling: emerging large-scale technologies with industrial potential. *ChemSusChem*, 4(9), 1194-1215.

[22] Ghoneim, S. A., El-Salamony, R. A., & El-Temtamy, S. A. (2016). Review on innovative catalytic reforming of natural gas to syngas. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(01), 116.

[23] Taskin, M. E., Dixon, A. G., Nijemeisland, M., & Stitt, E. H. (2008). CFD study of the influence of catalyst particle design on steam reforming reaction heat effects in narrow packed tubes. *Industrial & engineering chemistry research*, 47(16), 5966-5975.

[24] Nazemi, M., Panikkanvalappil, S. R., & El-Sayed, M. A. (2018). Enhancing the rate of electrochemical nitrogen reduction reaction for ammonia synthesis under ambient conditions using hollow gold nanocages. *Nano Energy*, 49, 316-323.

[25] Caetano, T., Winkler, H., & Depledge, J. (2020). Towards zero carbon and zero poverty: integrating national climate change mitigation and sustainable development goals. *Climate Policy*, 20(7), 773-778.

[26] Rai, V., Victor, D. G., & Thurber, M. C. (2010). Carbon capture and storage at scale: Lessons from the growth of analogous energy technologies. *Energy policy*, 38(8), 4089-4098.

[27] Zou, J., Han, N., Yan, J., Feng, Q., Wang, Y., Zhao, Z., & Wang, H. (2020). Electrochemical compression technologies for high-pressure hydrogen: current status, challenges and perspective. *Electrochemical Energy Reviews*, 3(4), 690-729.

[28] Barreto, L., Makihiro, A., & Riahi, K. (2003). The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(3), 267-284.

[29] Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1-3), 1-76.

[30] Leigh, G. J. (2004). Haber-Bosch and other industrial processes. In *Catalysts for nitrogen fixation* (pp. 33-54). Springer, Dordrecht.

[31] Marcinek, A., Guderian, J., & Bathen, D. (2021). Process intensification of the high-purity nitrogen production in twin-bed Pressure Swing Adsorption plants. *Adsorption*, 27(6), 937-952.

[32] Song, H., Guo, H., Wang, Y., Lao, J., Zhu, H., Tang, L., & Liu, X. (2021). A novel hybrid energy system for hydrogen production and storage in a depleted oil reservoir. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), 18020-18031.

[33] <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/anion-exchange-membrane-ammonia-production>

[34] <https://www.energy.gov/eere/ssl/downloads/low-pressure-electrolytic-ammonia-production>.

Teknolojik Hedef 4:

MAVİ/YEŞİL METANOL ÜRETİMİ

Metanol üretiminde kuyudan depoya (Well to Tank – WTT) karbon ayak izinin azaltılması, mavi ve yeşil methanol üretimlerinin gerçekleştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.

4.1. Mavi Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

4.1.a. Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 4.1.

4.1.Mavi Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Doğal gazdan metanol üretiminin karbon yoğunluğunu azaltmak için, düşük karbonlu metanol (Low carbon methanol-LCM) üretim prosesleri geliştirilmektedir. Doğal gaz kullanırken CO₂ emisyonlarını azaltmanın birkaç yolu bulunmaktadır. Bir seçenek, metanol sentez döngüsüne başka bir kaynaktan/tesisten CO₂ enjekte etmektir. Bir diğeri ise doğal gazdan metanol üretiminde ilk adımı olan sentez gazına dönüştürme adımından sonra karbondan (CO₂) arındırma işleminin uygulanmasıdır. Doğal gazdan sentez gazı üretimi enerji yoğun bir süreçtir ve doğal gazın > 800°C sıcaklıkta reformlanması için gerekli enerjiyi sağlamak üzere doğal gaz besleme akımının bir kısmının yakılmasını gerektirmektedir. Doğal gazın reformlama reaksiyonları sırasında da bir miktar CO₂ açığa çıkmaktadır. Doğal gazın yenilenebilir enerjiyle sağlanan elektrikli ısıtma yoluyla reformlanması, reformlama reaksiyon ısısını sağlamak üzere doğal gaz yakma işleminden gelen CO₂ emisyonlarını ortadan kaldıran bir çözümdür. Metanol sentez döngüsünde açığa çıkan karbondioksit ile yenilenebilir enerji kullanılarak suyun elektroliziyle üretilen hidrojenin birlikte kullanımı da doğalgazdan metanol üretiminin karbon yoğunluğunu düşürmenin bir başka yoludur.

2021 yılı global metanol üretimi 107 milyon ton mertebesindedir. Metanol talebinin artarak 2025'e kadar 120 Mt'a ve 2050'ye kadar 500 Mt'a ulaşması beklenmektedir.

TÜİK'ten alınan verilere göre ülkemizin 2020 yılı metanol ithalatı yaklaşık olarak 560.000 ton'dur. İthal edilen metanolün toplam tutarı yaklaşık 120 milyon USD'dir.

Yeni nesil araç teknolojilerinin ülkemiz pazarına girmeye başladığı günümüzde metanole olan talebin ülkemizde de önemli bir artış göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle yenilenebilir ve sürdürülebilir metanol üretim teknolojisinin kazanılması ülkemiz için de kritiktir.

Metanol üretimi için odun atığının kuyudan tekere (WTW) CO₂ eşdeğer emisyonu 5,3-22,6 g CO₂-eq/MJ olarak hesaplanmıştır. Fosil yakıtlardan benzin üretimi için hesaplanan emisyonların yaklaşık 83,8 g CO₂-eq/MJ olduğu göz önüne alındığında metanolün çevre dostu bir kimyasal depolama ajanı olduğu değerlendirilmektedir.

Biyo-metanol tesislerinde metanol üretiminin en önemli yolu doğalgaza alternatif yakıtlardan sentez gazı eldesine dayanmaktadır. Sentez gazı eldesinin en önemli alternatiflerinden biri katı ve sıvı yakıtların gazlaştırılmasıdır. Katı hammaddelerin gazlaştırıcıya beslenmeden önce bir şekilde homojenleştirilmeleri gerekmektedir. Bu, hem proses kontrolü hem de besleme sistemi tasarımı açısından önemlidir. Katıları basınca karşı eşit bir akış hızında itmenin teknolojik zorluğu, 5-10 bar gibi nispeten düşük bir gazlaştırıcı basıncının seçimine yol açmaktadır. Besleme sisteminin düzgün ve güvenli bir şekilde çalışması için bir inert gaz gerekebilmektedir. Besleme, kağıt hamuru ve kağıt fabrikalarından gelen siyah likörde olduğu gibi sıvı haldeyse, besleme sistemi daha basittir ve ağır atık yağ besleme sistemi ile uyumludur. Bu besleme sistemleri, gazlaştırma ünitesinin 30-60 bar gibi yüksek bir basınçlarda çalışmasını mümkün kılmaktadır.

Gazlaştırıcı teknolojisi, farklı yaklaşımlarla sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar reaktör tipine, kullanılan oksidasyon ajanı türüne ve kül ergime durumuna göre yapılabilmektedir.

Reaktör türüne göre temelde üç farklı gazlaştırıcıdan söz edilebilir. Bunlar sabit yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklemeli akış gazlaştırıcılarıdır. Her bir türün ayrıca alt türleri de mevcuttur. Bu gazlaştırıcıların seçiminde özellikle yakıt tipi, yakıt fiziksel özelliği ve kapasite önemli rol oynamaktadır. Genel olarak düşük kapasiteli büyük parçacıklı biyokütleler için sabit yatak gazlaştırıcıların, düşük kalorili kömürler için akışkan yataklı gazlaştırıcıların, yüksek kalorili kömürler ve yüksek kapasiteli uygulamalar için de sürüklemeli akış gazlaştırıcılar tercih edilmektedir. Her bir gazlaştırıcı için bu genel uygulamaların istisnaları da görülmektedir.

Gazlaştırmada oksidasyon ajanı olarak hava, oksijen su buharı ve bunların karışımları kullanılabilir. Hava ile gazlaştırmada daha düşük ısı değerli sentez gazı elde edilmektedir. Düşük kapasiteli elektrik uygulamalarında genelde daha ekonomik olan hava ile gazlaştırma seçilmektedir. Yüksek kapasiteli özellikle son ürün olarak kimyasal ve sıvı yakıtların hedeflendiği uygulamalarda ise oksijenle gazlaştırma tercih edilmektedir. Oksijen gazlaştırmada ortamda azot olmadığı için 10-12 MJ/Nm³ ısı değere sahip sentez gazı elde edilmektedir. Su buharı gazlaştırma sonucunda yüksek H₂ içerikli bir sentez gazı elde edilmektedir. Ancak su buharı gazlaştırma endotermik olduğu için ya dışarıdan ilave ısı verilmekte ya da saf oksijenle birlikte karıştırılarak gazlaştırılmaktadır.

Kül ergime açısından gazlaştırıcılar cürufsuz ve cürüflü olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır; Birincisi, yenilenebilir hammaddeler için ortak iken, ikincisi, birkaç istisna dışında, yüksek kalorifik değere sahip fosil hammaddelerinin gazlaştırılması için kullanılmaktadır. Cürüflü gazlaştırıcılar cürufun erime noktasının üzerinde çalışmaktadır. Cürüflanma sıcaklığı ise tipik olarak 1000°C'nin üzerindedir. Yüksek kalorifik değere sahip kömür için cürüflü gazlaştırmanın (sürüklemeli yatak) ticari uygulaması mevcuttur. Cürufsuz

gazlaştırma, gazlaştırıcıya beslenen yakıtın gazlaştırıcıda erimesine izin verilmediği anlamına gelmektedir. Maksimum cüruf oluşturmaya sıcaklık 800-900°C'dir ve gazlaştırıcı bu sıcaklıklarda çalışmaktadır. Cürufsuz gazlaştırmada katran ve metan oluşumu fazladır. Cürufsuz gazlaştırma (kabarcıklı veya dolaşimli akışkan yatak gazlaştırıcılar) biyokütle ve atık gibi düşük kalorifik değere sahip yakıtlar için uygundur. Başvurulacak gaz temizleme prosesi, gazlaştırıcı tipine ve besleme bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Belirli ham maddeler sonraki işlemlerde istenmeyen kirleticilerin oluşumuna yol açmaktadır.

Gazlaştırıcılarda genel problem emre amadeliliğin geleneksel termokimyasal yöntemlere (Örn: Yanma) göre daha düşük olmasıdır. Özellikle yüksek kirletici (Katran, H₂S, NH₃ vb) oranları hem proses kontrolünü hem de işletmesini zorlaştırmakta, sık sık duruşlara yol açmaktadır. Gazlaştırma problemleri seçilen yakıt türüne, reaktör türüne, oksidasyon ajanı türüne göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Örneğin genel olarak biyokütle gazlaştırmasında kömüre oranla daha yüksek katran oluşurken, linyit gazlaştırmada biyokütleyle oranla daha yüksek H₂S açığa çıkmaktadır. Oksijen gazlaştırmada ani sıcaklık artışları hava ile gazlaştırmaya göre daha sık gözlenmektedir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırma prosesinin yanında akışkanlaşma hidrodinamiğinin de kontrol edilmesi gerekliliği ayrıca bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Biyometanol tesislerinde doğal gaz yerine biyogaz kullanımı da mümkündür. Biyogazın, su buharı reformlama ünitesine beslenmeden önce doğal gazla aynı kaliteye getirilmesi için ön işleme tabi tutulması gerekmektedir. Metandan sentez gazı eldesinde iki veya üç farklı reformlama teknolojisinin aynı anda kullanılabilir. Bu teknolojiler, su buharı reformlama, kısmi oksidasyon ve CO₂ ile gerçekleştirilen kuru reformlamadır. Biyogazın saflaştırma adımında ayrılan CO₂, kullanılan metan reformlama teknolojisine bağlı olarak sentez gazı akımına geri beslenerek prosesin toplam CO₂ emisyonları azaltılabilmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

4.1.a. Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Günümüzde sera gazı emisyonlarını kontrol altına almak için metanol üretiminin yenilenebilir ve sürdürülebilir yöntemler ile gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple CO₂'den metanol üretimi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Doğal gazdan ve kömürden 1 kg metanol üretimi sonucu atmosfere sırasıyla 0,5 kg ve 2,6-3,8 kg CO₂ eşdeğeri karbon emisyonu salınmaktadır. Metanol üretim prosesinin karbon emisyon yoğunluğunu azaltmak için metanol üretim döngüsüne CO₂'in dahil edilmesi bu nedenle önemlidir. Metanol üretiminde

karbondioksitin üretim döngüsüne dahil edilmesi, karbondioksiti küresel ısınma sorumluluğundan alarak metanol ekonomisi için temel hammaddeye dönüştürmektedir. Bu nedenle biyogazın CO₂ içeriğinin ayrılmadan birlikte reformlanmasına yönelik ileri reformlama teknolojilerinin ve katalizörlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Karbondioksitten yenilenebilir metanol üretiminde en önemli performans göstergelerinden biri üretim maliyetidir. Doğal gaz ve kömürden metanol üretim maliyetleri 100-250 USD/ton arasındadır. Biyoenerji Karbon Tutma ve Depolama'da (BECCS) CO₂'in ton başına 10-50 USD/ton maliyetle tutulduğu kabulü ile 6 USD/GJ biyokütle maliyeti için, işletme maliyetleri ve dönüşüm verimlerine bağlı olarak, biyokütleden biyo-metanol maliyeti 320 USD/ton - 770 USD/ton aralığında değişmektedir.

Karbon kredi uygulaması ile biyometanol maliyetinin önemli ölçüde azaltılabileceği değerlendirilmektedir. Doğal gazdan metanol üretimi ile karşılaştırıldığında, ton yenilenebilir metanol başına CO₂ eşdeğeri emisyonların yaklaşık 1,6-1,7 ton azalacağı öngörülmektedir. 100 USD/ton CO₂ karbon kredisi için yenilenebilir metanol maliyetinin 160-170 USD/ton azalması beklenmektedir.

Gri/mavi metanol üretimi kombinasyonları, yeşil metanole aşamalı geçişi kolaylaştırabilecek ve metanol üretim tesislerinin karbon emisyonlarını azaltmasını mümkün kılacak hibrit çözümler olarak değerlendirilmektedir. Ancak yenilenebilir biyometanolün benimsenmesinin önündeki ana engel üretim maliyetidir.

Biyokütle artıkları ve atıklar heterojen bir bileşime sahip olduğundan temiz sentez gazı eldesi için gazlaştırma ve gaz temizleme teknolojileri yeterli ticari olgunluğa henüz ulaşmamıştır.

Biyogazın CO₂ içeriğinin kuru gaz reformlama amacıyla kullanılması için katalizör ve proses geliştirilmesi gerekmektedir.

Büyük, modern bir doğalgaz girdili metanol üretim tesisi için genel enerji dönüşüm verimi %70 civarındadır. Kömürden metanole enerji dönüşüm verimliliği, teknoloji seçimine bağlı olarak %50-60 mertebesindedir. Yenilenebilir metanol tesislerinin performansı (belirli bir dönemde, örn. bir yılda üretilen metanol miktarı), tesis kurulumu (örn. hammadde, yan ürünler, teknoloji) ve yerel koşullar gibi birçok faktöre bağlıdır. Metanol üretim tesislerinin verimliliği, tesiste yer alan her bir ünitenin enerji dönüşüm verimliliklerinin çarpımı ile hesaplanabilmektedir. Örneğin bir biyokütle gazlaştırma ile metanol üretim tesisinde gazlaştırma verimi %70-80, su-gaz şift reaktörü verimi 95-97%, metanol sentezi verimliliği %79-80 kabulü ile toplam tesis veriminin %53-62 arasında olabileceği öngörülmektedir. Yaklaşık %60 toplam enerji dönüşümü, biyokütle için tipikken, belediye katı atık için enerji dönüşümü %50 civarındadır. Biyometan elde etmek üzere temizlenen, saflaştırılan ve reformer bazlı bir metanol üretim prosesine

beslenen biyogazdan metanol üretim verimliliği ise konvansiyonel doğal gaz beslemeli bir metanol üretim tesisi ise aynı (~%70) dönüşüm verimliliğine sahip olacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

Sürdürülebilir ve karbon nötr kaynaklardan temiz sentez gazı üretimine imkan veren teknolojiler mevcut olduğu takdirde sentez gazından metanol üretim prosesi ticari olarak uygulanmaktadır (THS9 seviyesindedir). Biyokütle ve atıklardan metanol üretimi üzerine öncü tesisler mevcut olup, THS8 seviyesine ulaşıldığı değerlendirilmektedir.

4.1.a.Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fosil yakıt temelli sentez gazından metanol üretimi için kullanılan kendini, kanıtlamış ve ticari teknolojiler e-metanol üretimi için de kullanılabilir. CO₂ ve yeşil hidrojen sağlandığında, tek adımda metanol üretimi ve distilasyonu olgun bir teknolojidir.

Dünya’da temizlenmiş sentez gazından (hidrojen ve karbonmonoksit) metanol üretim katalizörleri ticarileştirilmiş durumdadır. CO₂’dan metanol üretim katalizörleri ise ticarileşme aşamasındadır.

Temizlenmiş sentez gazından (hidrojen ve karbonmonoksit) metanol üretim prosesi ve katalizörleri konusu ile ilgili olarak TÜBİTAK MAM tarafından Müşteri kurumun TKİ olduğu

“Tunçbilek Metanol Üretimi – Sentez Gazından Metanol Üretimi” projesi 2014 yılında başlayıp 2016 yılında tamamlanmıştır. Mevcut alt yapı ve deneyim, THS: 4-5 seviyesine ulaşıldığını göstermektedir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

4.1.a.Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Metanex Corporation, komşu bir endüstriyel tesisten ayrılan CO₂'yi metanol sentez döngüsüne enjekte ederek düşük karbonlu metanol (LCM) üretmektedir. Bu süreçte üretilen düşük karbonlu metanol bir yakıt olarak kullanıldığında sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Metanex'e göre, tamamen düşük karbonlu metanole dayanan bir araç, benzinle çalışan bir araca göre kuyudan tekerleğe analizine göre kilometre başına %30 daha az CO₂ salımına yol açmaktadır. Qatar Fuel Additives Şirketi (QAFAC) gibi metanol üreticileri, CO₂'yi baca gazlarından (egzoz gazı) ayırarak metanol üretiminde değerlendirmektedir. Bu sayede sera gazı emisyonları ve su tüketimi azalmaktadır.

Doğal gazdan düşük karbonlu metanol üretmek için benzer emisyon azaltımları sağlayan başka büyük ölçekli teknolojiler de bulunmaktadır. Bir teknoloji lisanslama şirketi olan Johnson Matthey, yenilenebilir elektrik kullanarak düşük karbonlu metanol üreten İleri Birleşik Reformlama-Advanced Combining Reforming adlı bir proses geliştirmiştir. Hava ayırma ünitesi, hava kompresörleri de dahil olmak üzere tüm kompresör de yenilenebilir elektrik kullanarak düşük karbonlu metanol üretilmektedir. Haldor Topsoe, eSMR (elektrikli buhar metan reformlama) adlı kompakt, tamamen elektrikli bir metan buhar dönüştürücü geliştirmektedir.

Hollanda merkezli BioMCN, metanol üretim prosesinde hammadde olarak geleneksel doğal gazı biyogazla ikame ederek yenilenebilir metanol üretmektedir. Şirket, boru hattı kalitesine yükseltilerek Hollanda ulusal gaz şebekesine enjekte edilen belediye katı atık depolama alanı veya havasız çürütme tesisleri dahil olmak üzere çok sayıda farklı kaynaktan gelen biyogazı kullanmaktadır. BioMCN, Hollanda'nın kuzeydoğusundaki Delfzijl'de bulunan tesisinde toplam 900.000 ton kapasiteli iki metanol üretim hattı işletmektedir. 2006 yılında, gliserinden yenilenebilir metanol üretmek amacıyla kurulan BioMCN, 2015 yılında OCI N.V. tarafından satın alınmış ve biyogazdan yenilenebilir metanol üretmeye devam etmiştir. 2017 yılında Avrupa taşımacılık sektöründe öncelikle biyoyakıt olarak satılan yaklaşık 60.000 ton yenilenebilir metanol üretimi gerçekleştirilmiştir.

Alman kimya şirketi BASF, 2018'den beri Almanya'nın Ludwigshafen kentindeki mevcut metanol üretim tesisinde doğal gazla ortak besleme olarak biyometan kullanmaktadır. Sonuç olarak, geleneksel olarak üretilen metanole kıyasla sera gazı emisyonları en az %50 oranında azaltılmaktadır.

Linde, doğal gazın su buharı ile reformlanması prosesinde buharın bir kısmının CO₂ ile değiştirildiği "kuru reformlama" olarak adlandırılan bir konsept geliştirmiştir.

Yerli linyitlerimizin gazlaştırılmasıyla elde edilecek sentez gazından metanol sentezi katalizörleri konusu ile ilgili olarak TÜBİTAK MAM tarafından Müşteri kurumun TKİ olduğu "Tunçbilek Metanol Üretimi – Sentez Gazından Metanol Üretimi" projesi 2014 yılında başlayıp 2016 yılında tamamlanmıştır. Proje kapsamında metanol üretim katalizörlerinin geliştirilmesi konusunda önemli bir araştırma alt yapısı kurulmuş ve metanol katalizörlerinin üretimi, karakterizasyonları ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Projede üretilen katalizörlerin, uluslararası katalizör firmalarının uzun yıllara dayanan araştırma ve deneyimleri sonucu ürettikleri ticari katalizörlere göre daha kısa sürede aktif hale geldikleri (aktif faza indirgenebildikleri) karakterizasyon çalışmaları ile (TPR) gösterilmiştir. Projede ayrıca 3 ton/gün kapasiteli bir metanol sentez tesisinin tasarımı yapılmıştır. Bu kapsamda temizlenmiş sentez gazından metanol üretimi için gerekli adımlar olan su gaz dönüşüm, CO₂ ayırma, metanol sentezi, metanol saflaştırma (distilasyon) alt prosesleriyle bu proseslere destek veren çevre birimleri tüm detaylarıyla tasarlanmıştır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

4.1.a.Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Kimya, Kimya Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Proses Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, Çevre Mühendisliği başta olmak üzere çok disiplinli bir malzeme ve proses geliştirme ekibinin bir arada çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstri 4.0 çağında Kimya, Gıda ve Enerji Sektörlerinde "Arz Güvenliği ve Dekarbonizasyon Stratejilerinin" öngördüğü yeni nesil Temiz Enerji-Yeşil Kimya teknolojileri artık "Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi" yöntemlerinin bu süreçlere entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda mevcut deneysel verileri analiz ederken çeşitli istatistiksel ve optimizasyon araçları ile birlikte makine öğrenmesi bir diğer değişle yapay zeka kullanılmaktadır. Bu kapsamda Bilgisayar Mühendisliği ile de disiplinler arası bir işbirliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırma üniversiteleri, araştırma merkezleri ve kimyasal üretim yapan özel sektör ve mühendislik tasarımları ve uygulamaları konusunda uzman özel sektör kuruluşlarının biraraya

gelmesi gerekmektedir. İlgili Bakanlıklar (Enerji ve Tabii Kaynaklar ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlıkları ve bu Bakanlıklara bağlı alt kuruluşların da bu çalışmalarını kontrol ve yönlendirme amacıyla projeleri takip etme konumunda bulunmaları beklenmektedir.

Araştırma üniversitelerinden THS:3-4 seviyesinde, araştırma merkezlerinden THS:4-6 seviyesinde ve özel sektör kuruluşlarından THS:6-9 seviyesinde katkı alınmalıdır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

4.1.a.Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Kömür, biyokütle ve organik atıklardan CO₂ salımsız metanol üretimi üzerine türünün ilk örneği tesislerin ülkemizde de kurulması için özel sektör kuruluşları, ilgili kamu kuruluşları, araştırma merkezleri ve üniversiteler teknoloji platformları üzerinden bir araya gelmelidir. Bu tip metanol tesislerine yerli teknolojilerin kullanımı kaydıyla teşvikler getirilmelidir. Örneğin düşük faizli yatırım kredileri, alım garantileri, vergi avantajları gibi.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

Ar-Ge çalışmaları kısa vade: 1-3 yıl

Ür-Ge çalışmaları orta vade:3-5 yıl

4.1.a.Kömürden, biyokütle ve organik atıklardan elde edilen sentez gazından karbondioksit salımsız metanol üretimine ilişkin proseslerin geliştirilmesi

Ülkemizde Soma ve Tunçbilek'te pilot/demonstrasyon ölçeğinde gazlaştırma tesisleri mevcuttur. Söz konusu tesislerin revize edilerek sentez gazından CO₂ salımsız metanol üretimi üzerine yenilikçi bir proses ve yenilikçi katalizörlerin saha testleri yapılabilir. Bu çalışmalar için 2-3 yıl bir süre gerekmektedir. Bu teknolojinin türünün ilk örneği bir ticari tesis ölçeğinde, örneğin yılda 10 bin ton metanol üretimi, gösteriminin yapılması orta vadeli bir hedef olarak değerlendirilebilir.

Bu kapsamda araştırma projeleri, pilot tesis ve öncü tesis çalışmaları için toplamda ticari uygulama dahil mavi/yeşil metanol üretim teknolojilerinin tamamı için 40-50 milyon dolarlık bir bütçenin ayrılmasının yeterli olabileceği değerlendirilmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Rekabet öncesi işbirliği teknoloji platformlarının kurulması, paydaşların bir araya getirilmesi, Ar&Ge ve Ür&Ge çalışmaları için destek programlarının oluşturulması

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Mevcut mevzuat yeterli değildir, teknolojik ilerlemeye imkan tanımamaktadır. Ülkemizde türünün ilk örneği ticari metanol üretim tesisi için, yerli proses ve katalizör teknolojisi kullanılması kaydıyla, yatırım desteği, vergi avantajları ve alım garantileri verilmesi üzerine mevzuat ve yasal düzenlemeleri yapılabilir.

Teknik Altyapılar

Ülkemizde Soma ve Tunçbilek'te pilot/demonstrasyon ölçeğinde entegre gazlaştırma tesisleri mevcuttur. Metanol üretim tesis tasarımı üzerine kapsamlı bir mühendislik çalışması da TÜBİTAK MAM ve TKİ tarafından gerçekleştirilmiştir.

İnsan Kaynakları

Kömür & biyokütle kaynaklarının termokimyasal dönüşüm prosesleri (gazlaştırma, piroliz vb.), sentez gazı şartlandırma ve gaz temizleme prosesleri, CO₂ ayırma prosesleri ve metanol üretim prosesleri üzerine akademik ve teknolojik araştırma tecrübesine sahip nitelikli personel mevcuttur. Bu teknolojilerin saha gösterimlerinin ilgili sanayi kuruluşları ile birlikte gerçekleştirilmesi ve teknolojik dar boğazların belirlenmesi için saha çalışmalarını yürütecek nitelikli personel istihdamına ihtiyaç bulunmaktadır.

Destek ve Teşvikler

Ülkemizde türünün ilk örneği ticari metanol üretim tesisi için, yerli proses ve katalizör teknolojisi kullanılması kaydıyla, yatırım desteği, vergi avantajları ve alım garantileri verilmesi üzerine mevzuat ve yasal düzenlemeler yapılabilir.

Kritik Ürün/Teknoloji 4.2.

4.2. Yeşil Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Kritik Ürün/Teknoloji 4.2.

4.2. Yeşil Metanol üretimine yönelik teknolojilerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Metanol, dünyanın en yaygın ticareti yapılan kimyasal emtiasıdır ve her yıl 95 milyar litreden fazla üretilmektedir. 100 yılı aşkın bir süredir metanol güvenli bir şekilde üretilmekte, nakliye edilmekte, depolanmakta ve kimya sektöründe önemli bir hammadde olarak üretimde kullanılmaktadır. Ortam sıcaklığında ve basıncında sıvı fazda bulunduğu için alternatif yakıt olarak kullanımı için de özel bir alt yapı gereksinimi bulunmamaktadır. İçten yanmalı motorlar, yakıt hücreleri ve enerji üretim tesislerinde çok fazla bir revizyon yapılmadan kullanımları mümkündür.

Yeşil metanol, sürdürülebilir biyokütleden veya yenilenebilir elektrikten üretilen hidrojen ile karbondioksitten üretilen düşük karbonlu bir kimyasaldır. Yenilenebilir yeşil metanol, enerji santralleri için bir enerji kaynağı, ulaşım sektöründe alternatif yakıt veya binlerce günlük üründe bir kimyasal yapı taşı olarak kullanılabilir.

Rüzgar ve güneş fotovoltaik (PV) ile yenilenebilir elektrik üretimi, günümüzde dünyanın pazar payı en hızlı büyüyen enerji dönüşüm sistemleridir. Ancak üretilen elektrik için yeterli talep olmasa bile rüzgar ve güneşten üretilen elektrik sevk edilmelidir. İhtiyaç fazlası elektrik üretimi söz konusu olduğunda operatörlerin yenilenebilir kaynağı şebekeden ayırmaktan başka pek seçeneği bulunmamaktadır. Bu durum enerji kaybına ve ek maliyetlere yol açmaktadır. Üretilen ihtiyaç fazlası yenilenebilir elektriği yenilenebilir metanol üretiminde ihtiyaç duyulan hidrojen eldesinde kullanmak önemli bir seçenektir. Yenilenebilir metanol üretimi için temiz hidrojen üretmek üzere elektroliz ünitesinde yenilenebilir elektrik kullanılmaktadır.

Metanol üretimi için sentez gazı eldesinde ihtiyaç duyulan karbon, karbondioksit olarak endüstriyel baca gazlarından veya hatta havadan yakalanabilir.

Sentez gazı, belediye katı atıkları veya orman kalıntıları gibi herhangi bir karbon kaynağının gazlaştırılması ile de üretilmektedir. Düzenli depolama alanlarından, atık su arıtma tesislerinden veya hayvan atıklarından fermantasyon yoluyla elde edilen biyogaz da metanol üretimi için hammadde olarak kullanılmaktadır.

2021 yılı global metanol üretimi 107 milyon ton mertebesindedir. Metanol talebinin artarak 2025'e kadar 120 Mt'a ve 2050'ye kadar 500 Mt'a ulaşması beklenmektedir.

TÜİK'ten alınan verilere göre ülkemizin 2020 yılı metanol ithalatı yaklaşık olarak 560 000 ton'dur. İthal edilen metanolün toplam tutarı yaklaşık 120 milyon USD'dir.

Yeni nesil araç teknolojilerinin ülkemiz pazarına girmeye başladığı günümüzde metanole olan talebin ülkemizde de önemli bir artış göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle yenilenebilir ve sürdürülebilir metanol üretim teknolojisinin kazanılması ülkemiz için de kritiktir.

Yenilenebilir metanol üretimi için alternatif hammaddelerin tüm dünya genelinde son derece ulaşılabilir olduğu göz önüne alındığında, yenilenebilir metanolün yerel olarak mevcut kaynaklardan üretiminin her ülke için potansiyel vaat ettiği açıktır. Bu potansiyelin etkin kullanımı halinde petrol ve doğal gaz gibi kaynaklara kısıtlı erişimi olan ülkelerin ithal petrol ve petrol ürünlerine olan bağımlılığı azalacak ve enerji ve kimyasallarda arz güvenliği artacak ve ülke ekonomisine önemli bir katkı sunacaktır.

Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında yenilenebilir metanol, hammadde ve dönüşüm sürecine bağlı olarak karbon emisyonlarında %65 ila 95 oranında azalma sağlamaktadır. Bu oranlar, benzin, dizel, kömür ve metanın yerini almak için şu anda geliştirilmekte olan diğer alternatif yakıtlar arasında en yüksek emisyon azaltımı sağlayan oranlardan biridir. Ayrıca saf metanolün yanması sonucu kükürt oksit (SOx) ve partikül madde salımı olmamakta, azot oksit (NOx) salımı ise son derece düşük bir seviyede gerçekleşmektedir.

Metanol üretimi için odun atığının kuyudan tekere (WTW) CO₂ eşdeğer emisyonu 5,3-22,6 g CO₂-eq/MJ olarak hesaplanmıştır. Fosil yakıtlardan benzin üretimi için hesaplanan emisyonların yaklaşık 83,8 g CO₂-eq/MJ olduğu göz önüne alındığında metanolün çevre dostu bir kimyasal depolama ajanı olduğu değerlendirilmektedir. Biyometanol ile e-metanol proseslerinin entegre edilmesi ile CO₂ WTW emisyonlarının çok daha az olacağı açıktır.

Karbondioksit; üre, aromatik ve alifatik polikarbonatlar, salisilik asit ve trifloropropilen karbonat gibi kimyasalların üretiminde kullanılmaktadır. Üre ve etilen gibi kısıtlı sayıda karbon içerikli kimyasal yılda yüz milyon tonun üzerinde bir kapasitede üretilmesine karşın, 34 milyar ton antropojenik karbondioksit salımı gerçekleşmektedir. Metanolün alternatif yakıt olarak kullanımı ile birlikte kimyasal ve alternatif yakıt olarak metanol talebinin bu kimyasallara olan talebin çok üzerinde olması beklenmektedir. Metanol yakıt olarak kullanıldığında, karbon tekrar karbondioksite dönüştürülmektedir, ancak karbon dioksit fosil olmayan yakıt kaynaklarından elde edilirse, süreç genel olarak karbon nötrdür. Bu nedenle biyokütle kaynaklı ya da havadan tutulan karbondioksit ve yenilenebilir hidrojen kullanılarak yeşil metanol üretimi yeşil kimyasallar sektöründe en büyük yaygın etki potansiyeline sahip kritik bir teknolojidir.

Bir rüzgar santrali, rüzgarın kuvvetli estiği ancak elektriğe çok az ihtiyaç olduğu gece saat 3'te zirve yapabilir. Bu durumda arz, talebi aşabilir ve elektrik şebekesini aşırı yüklenme tehdidi oluşturabilir. Bu olduğunda, iletim sistemi operatörü, şebekenin bütünlüğünü korumak için yenilenebilir kaynağın bağlantısını kesme eğilimindedir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerji israf edilir. Enerji endüstrisinde bu kısıtlama veya kesinti olarak bilinir. Bu kısıtlama yenilenebilir elektrik maliyetlerini yükseltmektedir. Örneğin Almanya'da elektrik dağıtım şirketleri, 2017'de zorunlu kısıtlama tazminatı olarak rüzgar enerjisi operatörlerine 1 milyar Avroya yakın ödeme gerçekleştirmiştir. Kaliforniya'da, şebeke operatörü, eyalette güneş enerjisinin yalnızca %1'ini kısıtlamasına rağmen, yılın belirli zamanlarında, güneş enerjisi kapasitesinin %20 ila %30'unu kısıtlamak olağandışı bir durum değildir. Üretilen yenilenebilir elektriğin merkezi şebekeye arzını kısıtlamak yerine depolama amaçlı olarak yenilenebilir metanol üretiminde değerlendirmek mümkündür. Yenilenebilir metanol kimya sanayinde hammadde olarak, temiz enerji üretiminde veya ulaşım sektöründe yenilenebilir bir yakıt olarak kullanılabilir. Metanol, enerji içeriği açısından petrol türevli yakıtlarla rekabet edebilir düzeydedir. Ancak yeşil metanol üretiminin yüksek maliyeti, ticarileştirilmesinin önündeki en önemli problemlerden biridir. Elektriğin fiyatı, yenilenebilir metanolün ana maliyet etkenlerinden biridir. Metanol üretiminde yenilenebilir elektrik, talebin düşük olduğu zaman diliminde temin edilirse fiyatı düşük bir seviyede tutulabilir. Bu durumdan yararlanmak için firmalar, elektrolizden temiz hidrojen elde etmek için fazla yenilenebilir enerjiden yararlanma fikri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Bir prosesin veya ürünün yenilenebilir, sürdürülebilir ve net CO₂ nötr olması için fermantasyon üniteleri ve evsel katı atık (MSW), biyogaz ve biyokütle yakarak elektrik üreten enerji santralleri gibi biyojenik CO₂ kaynaklarının giderek daha fazla kullanılması gerekmektedir. Bu CO₂ kaynakları normalde atık gazlar olarak işlenmekte ve bu nedenle atmosfere salınmaktadır. Günümüzde sera gazı emisyonlarını kontrol altına almak için metanol üretiminin yenilenebilir ve sürdürülebilir yöntemler ile gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple CO₂'den metanol üretimi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Ölçekten bağımsız olarak metanol sentezi 250-300°C ve 5-10 MPa'da bakır içeren bir katalizör (örn. CuO/ZnO/Al₂O₃) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak doğal gazdan ve kömürden 1 kg metanol üretimi sonucu atmosfere sırasıyla 0,5 kg ve 2,6-3,8 kg CO₂ eşdeğeri karbon emisyonu salınmaktadır. Metanol üretim prosesinin karbon emisyon yoğunluğunu azaltmak için metanol üretim

döngüsüne CO₂'in dahil edilmesi bu nedenle önemlidir. Biyokütle ve atıktan üretilen hidrojen ve metanol enerji değer zincirinde sera gazı nötral veya karbon nötral olarak kabul edilmektedir. Metanol üretiminde karbondioksitin üretim döngüsüne dahil edilmesi, karbondioksiti küresel ısınma sorumluluğundan alarak metanol ekonomisi için temel hammaddeye dönüştürmektedir.

Karbondioksitten yenilenebilir metanol üretiminde en önemli performans göstergelerinden biri üretim maliyetidir. Doğal gaz ve kömürden metanol üretim maliyetleri 100-250 USD/ton arasındadır. Biyoenerji Karbon Tutma ve Depolama'da (BECCS) CO₂'in ton başına 10-50 USD/ton maliyetle tutulduğu kabulü ile e-metanolün mevcut üretim maliyetinin 800-1600 USD/ton aralığında olacağı tahmin edilmektedir. Havadan CO₂ tutma (DAC) mevcut maliyetlerinin 300-600 USD/ton aralığında olduğu göz önüne alındığında e-metanol üretim maliyetleri 1200-2400 USD/ton aralığında değişmektedir.

Karbon kredi uygulaması ile hem biyo- hem de e-metanolün maliyetinin önemli ölçüde azaltılabileceği değerlendirilmektedir. Doğal gazdan metanol üretimi ile karşılaştırıldığında, ton yenilenebilir metanol başına CO₂ eşdeğeri emisyonların yaklaşık 1,6-1,7 ton azalacağı öngörülmektedir. 100 USD/ton CO₂ karbon kredisi için yenilenebilir metanol maliyetinin 160-170 USD/ton azalması beklenmektedir.

Günümüzde endüstriyel ölçekte metanol üretimi bakır, çinko ve krom esaslı katalizör kullanarak CO/H₂/CO₂ sentez gazı karışımı ile gerçekleşmektedir. CO₂'den metanol üretimi teknolojisi ise oldukça yeni bir teknoloji olmakla beraber besleme akımı yüksek oranda H₂ içermelidir.

Karbondioksitten metanol üretiminde açığa çıkan su için yüksek tolerans gösteren katalizörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca ticari Cu-Zn metanol üretim katalizörleri yüksek metanol seçiciliği ve düşük maliyeti ile iyi geliştirilmiş bir katalizör olmasına rağmen, yerinde metanol üretimi için ekzotermik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının kontrolü kritiktir. Reaksiyon ısı gereğince kontrol edilmezse bu durum katalizörün sinterlenmesine ve aktivitesini kaybetmesine yol açmaktadır. Sentez gazı bileşiminde ve debisindeki değişimler ve tesisin devreye girme/devreden çıkma frekansı da katalizörün performansını etkileyen diğer önemli parametrelerdir. Geliştirilecek olan katalizörlerin sentez gazı bileşimindeki değişimlere ve kirleticilere toleransının yüksek olması istenmektedir.

CO₂'den metanol üretimi ekzotermik bir reaksiyondur. CO₂'den metanol üretim reaksiyonunun yanı sıra endotermik ters su gazı dönüşüm reaksiyonu (RWGS) yüksek sıcaklık ve düşük basınç koşullarında gerçekleşerek CO oluşumuna da sebep olmaktadır. Oluşan karbon monoksit, metanol seçiciliğini düşürürken oluşan su buharı katalizörü deaktive etmektedir. açığa çıkan Yüksek miktardaki su buharı, Cu ve ZnO partiküllerinin kristalizasyon hızını

artırarak sinterlenmeyi hızlandırmaktadır ve buna bağlı olarak istenmeyen diğer yan ürünlerin de oluşmasına zemin sağlamaktadır. Termodinamik/kinetik engeller ortadan kaldırılıp tek-geçiş CO₂ dönüşümü artırıldığında ise reaksiyon seçiciliği karbonmonoksit üzerinden metanole kaymaktadır. Metanol seçiciliği ve CO₂ dönüşümünü artırmanın bir diğer yolu reaksiyon koşullarının optimizasyonudur. Yüksek basınçta ve H₂ kısmi basıncında reaksiyon hızı artmaktadır. Metanol seçiciliği üzerinde sıcaklık da önemli bir etkiye sahiptir.

Yukarıda verilen hususların dikkate alınarak CO₂'den metanol üretimi için katalizör ve katalitik proses geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Karbon yakalama ve kullanma tesisinde e-metanol ve biyo-metanol üretimini birleştirmek avantajlıdır. Biyokütlenin havadan fotosentez yoluyla CO₂ yakalamasına ilaveten tamamlayıcı olarak atmosferden antropojenik CO₂ yakalama için havadan doğrudan karbondioksit tutma (Direct air capture-DAC) teknolojilerinin geliştirilip ticarileştirilmesi önemlidir.

Ticarileşme sürecinde belirleyici olan biyo-metanol üretim maliyeti, biyo-hammadde maliyetinin, yatırım maliyetinin ve proses verimliliğinin kuvvetli bir fonksiyonudur. Metanol dönüşüm verimi % 50-70 ve 6 USD/GJ hammadde maliyeti için hammadde giderleri 170-240 USD/ton metanol arasındadır. Üretimin ticari olarak yapılabilir olabilmesi için hammadde maliyetinin toplam üretim maliyetindeki payının %50'i geçmemesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji fiyatlarında öngörülen düşüşlerle birlikte e-metanol maliyetinin 2050 yılına kadar 250-630 USD/ton seviyelerine düşürülmesi hedeflenmektedir.

Karbondioksitten metanol üretimi için 1 mol karbondioksit başına 3 mol hidrojen gereklidir. Ancak üretilen bir mol metanol başına 1 mol su reaksiyon ürünü olarak açığa çıkmaktadır. Konvansiyonel metanol üretimi ise karbon monoksit ile hidrojen arasındaki reaksiyon sonucu elde edilmekte olup, reaksiyon stokiometrisine göre su oluşmamaktadır. Karbondioksitten metanol üretiminde açığa çıkan su için yüksek tolerans gösteren katalizörlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Ticari Cu-Zn metanol üretim katalizörleri yüksek metanol seçiciliği ve düşük maliyeti ile iyi geliştirilmiş bir katalizör olmasına rağmen, yerinde metanol üretimi için ekzotermik reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısının kontrolü kritiktir. Reaksiyon ısısı gereğince kontrol edilmezse bu durum katalizörün sinterlenmesine ve aktivitesini kaybetmesine yol açmaktadır.

Ayrıca sentez gazı bileşiminde ve debisindeki değişimler ve tesisin devreye girme/devreden çıkma frekansı da katalizörün performansını etkileyen diğer önemli parametrelerdir.

Biyokütle ve atıktan küçük ölçekte metanol üretimi için sentez gazı bileşimindeki değişimlere ve kirleticilere toleransı daha yüksek olan katalizörlere ihtiyaç duyulmaktadır.

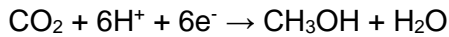
Reaktör tasarımı açısından da son derece ekzotermik bir reaksiyon olan metanol sentezi için reaktör sıcaklığının izotermal şartlarda kontrol edilmesi ve optimum işletme çalışma aralığının belirlenmesi diğer önemli hususlardır.

CO₂'dan metanol üretimi için ihtiyaç duyulan katalizör harici teknolojiler değerlendirildiğinde; Suyun hidrojen ve oksijene elektrolizi, alkalın ve PEM elektrolizörler için %75-85'lik mevcut verimlilikleri ile olgun bir teknolojidir. Fosil yakıtlı enerji santrallerinden ve endüstriyel süreçlerden büyük ölçekli karbon yakalama teknolojileri nispeten olgunlaşmıştır, ancak “Yenilenebilir elektrikten kimyasalların ve yakıtların üretimi, Power to X” sektörü için gereken büyük ölçek uygulamaları henüz mevcut değildir. Karbondioksitin doğrudan havadan yakalanması (Direct Air Capture-DAC) teknolojileri, Climeworks, Carbon Engineering ve Global Thermostat dahil olmak üzere birçok şirket tarafından çalışılan bir alandır. Havadan CO₂ yakalama, çeşitli CO₂ sorbentleri kullanılarak ortam sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Tutulan CO₂ daha sonra konsantre halde (%100'e kadar) sorbent CO₂'yi serbest bırakacak kadar yüksek bir sıcaklığa ısıtılarak salınmaktadır ve daha sonra metanol sentezi için kullanılmaktadır. DAC teknolojileri nispeten yeni olmasına rağmen (teknolojiye bağlı olarak THS ~4-7), hızla gelişmektedir. E-metanol üretimi, yenilenebilir kaynaklardan CO₂ kullanımını gerektirmektedir. Muhtemelen daha fazla rekabetin ve sınırlı bir kapasitenin olacağı biyoetanol ve biyogaz gibi proseslerin haricinde havadan CO₂ yakalama teknolojisinin daha büyük bir potansiyele sahip olduğu değerlendirilmektedir.

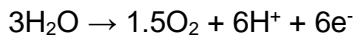
4.2.b.Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Elektrokimyasal olarak karbondioksit aktivasyonu ile reaktif bir ara ürün olan CO₂²⁻ oluşumu ve suyun ayrışması gerçekleşmekte ve CO₂'nin 6 elektron ile metanole indirgenmesine olanak tanımaktadır.

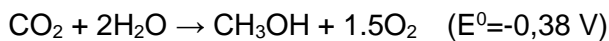
Katot:



Anot:



Toplam



Bu reaksiyonlar, metanol yakıt hücrelerinde gerçekleşen reaksiyonların tersine ilerlemektedir. Bu durum, her iki yönde de çalışabilen ve yeniden şarj edilebilir kimyasal bir pil işlevine sahip yakıt hücrelerinin geliştirilebileceğini göstermektedir. CO₂'nin metanole dönüştürülmesi için elektrokimyasal prosesler üzerine araştırmalar halen laboratuvar ölçeğinde olmasına rağmen,

öncelikli araştırma alanları arasında yer almaktadır. Karşılaşılan en temel zorluklardan biri CO₂'yi seçici olarak 4, 6 ve 8 elektronlu (sırasıyla elektrokimyasal ürün olarak formaldehit, metanol ve metan veren) tüm C1 ürünlerine indirgemek için katalizör optimizasyonudur. Metanol, standart koşullarda bakır elektrotlarda bir ürün olarak neredeyse hiç gözlenmediği için en ilgi çekici üründür. Bu sorunu aşmak için metanol üretiminde elektrokatalizör olarak molibden, tungsten, rutenyum, osmiyum, paladyum ve platin gibi değerli metaller denenmiştir. Ancak mevcut katalizörler ile düşük faraday verimleri ve akım yoğunlukları elde edilebilmiştir. Etkin bir katalizör geliştirebilmek için katalitik mekanizmaların derinlemesine anlaşılması gerekmektedir. Bimetalik katalizörler üzerinde seçici metanol sentezinde ilerleme kaydedilmesine karşın, ara ürün CO'dan seçici olarak CH₂O'ya ve ardından metanole nasıl geçilebileceğinin anlaşılması gerekmektedir. C1 ürünlerinin dağılımını kontrol etmek, özellikle metanol sentezi için hala bir sorundur. Son yıllarda gerçekleştirilen birçok çalışma, elektrokatalitik mekanizmanın elektrolit bileşimine (pH, katyonların varlığı) oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Elektrokimyasal ortamın doğasının CO₂ indirgenme aktivitesini ve seçiciliğini etkilediği bilinmektedir, ancak ortam koşullarının (pH, katyon/anyon türü ve konsantrasyonu) ayrıntılı etkisi tam olarak anlaşılammıştır. Organik katmanlar tarafından yapılan elektrot modifikasyonlarının, yine tam olarak anlaşılammayan önemli aktivite ve seçicilik etkilerine yol açtığı gösterilmiştir. Fakat susuz (organik) elektrolitlerdeki reaksiyon mekanizması ve bu ortamların reaksiyonu farklı ara maddelere ve ürünlere yönlendirip yönlendiremeyeceği konusunda literatürde ayrıntılı çalışmalar bulunmamaktadır. Umut verici ilerlemeye rağmen, reaksiyon seçiciliği, aktivitesi ve enerji verimliliğinde halen istenilen noktaya ulaşılamamıştır. Katalizör modifikasyonu, dönüşüm seçiciliğini ve verimliliğini artırmak için önemli bir faktördür. Örneğin, nanoyapılar elektroaktif reaksiyon yüzey alanını arttırmaktadır; bimetalik katalizörler farklı elektron yapılarına sahip farklı metaller arasındaki sinerjiden dolayı daha iyi sonuç verebilmektedir (örneğin, bir alaşım katalizörü); yüzey işlem veya modifikasyon ile katalizörlerin elektronik özellikleri ayarlayabilmektedir. CO₂ elektroindirgeme prosesinin ürün seçiciliği, aktivitesi ve verimliliği üzerinde reaksiyon ortamı ve reaksiyon şartları da etkindir. Örneğin CO₂ indirgeme seçiciliği Li⁺, Na⁺, K⁺, Cs⁺ gibi katyonik, Cl⁻, ClO₄⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, H₂PO₄⁻ gibi anyonik ve HCO₃⁻ konsantrasyonu ile değişmektedir. İyonik sıvıların elektrolit olarak kullanımı bir diğer seçenektir. İyonik sıvıların kullanımı ile sulu sistemlere göre daha iyi bir iletkenlik, daha yüksek bir CO₂ seçiciliği ve daha az parazitik hidrojen oluşum reaksiyonu gerçekleşmektedir.

Düşük sıcaklıkta (<100 °C) CO₂ elektroliz cihazlarının ticari olarak uygulanabilir olması için, ürün geçişini önleyen etkili bir ayırıcının kullanılması gerekmektedir. Katodik CO₂ indirgemede yan ürün olarak OH⁻ oluşumu ve HCO₃⁻ veya CO₃²⁻ oluşturmak üzere CO₂ ile hızlı bir şekilde dengelenmesi, tüm CO₂'nin en az %50'sini tüketen istenmeyen bir hammadde kaybıdır.

Metanol üretimi için CO₂'dan elektrokimyasal olarak CO ve sudan H₂ üretimi ve elde edilen yenilenebilir sentez gazından metanol üretimi de bir diğer alternatiftir. CO₂'dan CO üretimi için bildirilen en iyi performans, kararlı durumda ~200 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda >4000 saat süreyle çalıştırılan laboratuvar ölçekli (5 cm²) sistem için raporlanmıştır. Bu şartlarda CO₂ elektrolizörünün karbon verimliliği %50'dir ve hücre voltajı 3,0 V'tur, bu da yalnızca %43'lük bir enerji verimliliğine karşılık gelmektedir. Etilen gibi daha indirgenmiş bir ürün elde etmek için yukarıda bahsedilen CO₃²⁻ sorunu daha belirgindir. Kararlı durumda CO₂'dan etilen üretimi üzerine 60 saatlik bir çalışma için bildirilen en iyi performans, ~500 mA.cm⁻² akım yoğunluğunda ve ~%15'lik bir enerji verimliliğine karşılık gelen 3,9 V hücre voltajında ~%2 karbon verimidir. Mevcut durumda düşük sıcaklıkta CO₂ elektrolizi, enerji ve karbon verimliliğinde büyük kazanımlar olmadan diğer elektrik enerjisi depolama veya CO₂ dönüştürme teknolojileriyle rekabet edebilir bir noktada bulunmamaktadır. Yüksek akım yoğunluğunda ve kararlı halde gerçekleştirilebilmesi koşuluyla CO₂ indirgeme katalizinin aşırı potansiyelini azaltmak önem arz etmektedir. CO₃²⁻ oluşumunun neden olduğu kayıpların önlenmesi için CO₃²⁻ oluşumunun kontrol edilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine, yaratıcı hücre tasarımlarının yapılmasına ve anot üzerine daha fazla araştırma çalışmalarının gerçekleştirilmesine yönelik araştırmalar artırılmalıdır. CO₃²⁻ problemi üzerine kaydedilecek ilerlemenin, CO₂ elektrolizinin önümüzdeki 10 yıldaki gidişatını ve laboratuvar ötesi etkisini belirleyeceği değerlendirilmektedir.

50.000 saatten fazla çalışan ticari proton değişim membranları (PEM'ler) suyun elektrokimyasal olarak hidrojen ve oksijene ayrıştırıldığı elektrolizörlerin mevcut kullanım ömrüdür; bu aynı zamanda PEM CO₂ elektrolizörleri için de geçerli bir hedeftir.

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Havadan doğrudan CO₂ tutma teknolojileri (DAC) CO₂'dan yenilenebilir metanol üretim prosesinin teknoloji hazırlık seviyesini belirlemektedir. Havadan doğrudan CO₂ tutma teknolojileri (DAC) nispeten yeni olmasına rağmen (teknolojiye bağlı olarak THS ~4-7) hızla gelişmektedir. Fosil yakıt temelli sentez gazından (THS: 9) metanol üretimi için kullanılan kendini, kanıtlamış ve ticari teknolojiler e-metanol üretimi için de kullanılabilir. CO₂ ve yeşil hidrojen sağlandığında, tek adımda metanol üretimi ve distilasyonu olgun bir teknolojidir.

Dünya'da temizlenmiş sentez gazından(hidrojen ve karbonmonoksit) metanol üretim katalizörleri ticarileştirilmiş durumdadır. CO₂'dan metanol üretim katalizörleri de ticarileşme aşamasındadır.

Sentez gazından metanol sentezi katalizörleri konusu ile ilgili olarak TÜBİTAK MAM tarafından Müşteri kurumun TKİ olduğu "Tunçbilek Metanol Üretimi – Sentez Gazından Metanol Üretimi" projesi 2014 yılında başlayıp 2016 yılında tamamlanmıştır. Mevcut alt yapı ve deneyim, THS 4-5 seviyesine ulaşıldığını göstermektedir. Projede mevcut altyapı kullanılarak CO ve CO₂'dan metanol üretim katalizörlerinin formülasyon ve proses koşullarının optimize edilmesi planlanmakta ve metanol üretim katalizör ve reaktör sistemlerinin THS 6-8 seviyesinde çıkarılması hedeflenmektedir.

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Karbon nötr teknolojiye geçiş için CO₂ yakalamada sağlanacak ilerlemeler önem arz etmektedir. CO₂'den elektrokimyasal indirgeme ile CO ve etanol üretimi, en fazla umut veren potansiyel ürünlerdir. Hidrokarbonlar ve metanol gibi daha fazla indirgenmiş ürünlere CO₂'nin elektrolizi için elektrolizör/katalizör geliştirme, bu prosesleri geniş ölçekte ticari olarak uygulanabilir kılmak için gereklidir. Ticari uygulamayı hızlandırmak için elektrokimyasal reaksiyon mekanizmalarının, katalizörün elektrokimyasal indirgeme performansı üzerindeki etkisinin ve elektrolizör tasarımıyla reaksiyon ortamının nasıl kontrol edilebileceğinin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Mevcut durumda CO₂'dan elektrokimyasal olarak metanol üretiminin THS:3-5 seviyesinde olduğu değerlendirilmektedir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Carbon Recycling International (CRI), İzlanda'nın Blue Lagoon yakınlarında George Olah yenilenebilir metanol tesisini başarıyla kurmuştur. CRI'nin metanol tesisi, Svartsengi jeotermal elektrik santralinden atık karbondioksitin bir kısmını ve suyun elektrolizinden hidrojen üretmek için İzlanda şebekesinden gelen yenilenebilir enerjiyi kullanarak metanol üretmektedir. CRI tesisi adını, metanol ekonomisi fikrine öncülük eden Nobel ödüllü kimyager George A. Olah'tan (1927-2017) almıştır. Her yıl Svartsengi'den borularla taşınan karbondioksit CRI tesisinde metanol üretiminde kullanılmaktadır. Hidro ve jeotermal enerjiyle çalışan İzlanda elektrik şebekesi, suyu hidrojen ve oksijene ayırma işlemi için yeşil elektrik sağlamaktadır. Vulkanol ticari adıyla piyasaya arz edilen yenilenebilir metanol, temiz yanan ve yüksek oktanlı bir yakıttır. Direkt olarak araç yakıtı olarak veya benzinle karıştırılarak kullanılabilir. Ayrıca biyo-dizel veya yakıt eterleri veya sentetik kimyasal üretimi için bir hidrokarbon hammadde kaynağı olarak kullanılabilir. CRI, İzlanda, İsveç, Hollanda, Birleşik Krallık ve Çin'deki şirketlere

bu yakıtı tedarik etmektedir. CRI'ye göre, "Mevcut üretim tesisinde üretilen Vulcanol, çıkarmadan üretime ve son kullanıma kadar tüm ürün yaşam döngüsünde karbon emisyonlarını fosil yakıtlara kıyasla %90'dan fazla azaltmaktadır. Proses, ürün yaşam döngüsündeki sera gazı emisyonlarının hesaplanması için standart ISCC AB metodolojisine dayanan ISCC Plus sistemine göre SGS Almanya tarafından da onaylanmıştır. CRI'nin George Olah Yenilenebilir Metanol Tesisi, dünyanın en büyük karbondioksit metanol üretim tesisidir. Şirket, 2013 ile 2017 yılları arasında %440 artan ciro ile Avrupa'nın en hızlı büyüyen teknoloji şirketleri arasında yer almaktadır. CRI, Çin'de yenilenebilir metanol üretim tesislerini teşvik etmek ve kurmak için Geely Holdings ve Zixin Industrial Co ile ortaklık kurmuştur. Geely ve CRI, yerel şirketlerle işbirliği içinde, İzlanda'da Vulcanol ile çalışan Geely'nin %100 metanolla çalışan araçlarının uzun vadeli bir filo testini de gerçekleştirmiştir. Araçlar, 18 aylık bir süre boyunca 150.000 kilometreden fazla yol kat etmiş ve test katılımcıları, normal benzinli veya dizel yakıtlı arabalara kıyasla sürüş deneyiminde neredeyse hiçbir fark olmadığını bildirmiştir.

Merkezi Kanada, Montreal'de bulunan Enerkem, belediye katı atığından (MSW) temiz ulaşım yakıtları ve yenilenebilir kimyasallar üreten bir temiz teknoloji şirkettir. Enerkem, geri dönüştürülemeyen atıklardaki karbonu kimyasal olarak çıkarmak ve yeniden kullanmak için teknoloji geliştirmiş ve patentini almıştır. Geliştirdikleri proseste ilk olarak atık besleme stoğu sınıflandırılmakta ve işlenmektedir. Bir termokimyasal gazlaştırma işlemi ile sentez gazı elde edilmekte ve peşi sıra sentez gazı saflaştırılarak katalitik olarak biyoyakıtlara ve kimyasallara dönüştürülmektedir. Şirketin ilk amiral gemisi, ticari ölçekli atıktan biyoyakıt tesisi, Alberta, Kanada'da bulunmaktadır ve burada Edmonton Şehri'nin atık değerlendirme hedefini %50'den %90'a çıkarmasına yardımcı olmaktadır. Tesis, şehrin geri dönüştürülemeyen ve kompostlanamayan atıklarını kullanarak 2015 yılından bu yana metanol üretmektedir. Tesis, yılda 100.000 tondan fazla geri kazanılamayan atığı düzenli depolama sahasına göndermek yerine metanole dönüştürmektedir. Enerkem tesisi, 2016 yılında Uluslararası Sürdürülebilirlik ve Karbon Sertifikasyonu (ISCC) sistemine göre sertifikalandırılmıştır. Enerkem, Rotterdam'da her yıl geri dönüştürülemeyen plastik de dahil olmak üzere 350.000 ton atığı 270 milyon litre biyo-metanole dönüştürecek bir tesis inşa etmektedir. Enerkem teknolojisi ile 420 milyon tona kadar geri dönüştürülemeyen atık biyokimyasala dönüştürülebilmektedir. Şirket gıda dışı biyokütle kaynaklarından değerli ürünler üretmeyi hedeflemektedir.

Türkiye'de başarılı örnek ve girişimler

Sentez gazından metanol sentezi katalizörleri konusu ile ilgili olarak TÜBİTAK MAM tarafından Müşteri kurumun TKİ olduğu "Tunçbilek Metanol Üretimi – Sentez Gazından Metanol Üretimi" projesi 2014 yılında başlayıp 2016 yılında tamamlanmıştır. Proje kapsamında metanol üretim katalizörlerinin geliştirilmesi konusunda önemli bir araştırma alt yapısı kurulmuş ve metanol katalizörlerinin üretimi, karakterizasyonları ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Projede

üretile katalizörlerin, uluslararası katalizör firmalarının uzun yıllara dayanan araştırma ve deneyimleri sonucu ürettikleri ticari katalizörlere göre daha kısa sürede aktif hale geldikleri (aktif faza indirgenebildikleri) karakterizasyon çalışmaları ile (TPR) gösterilmiştir.

Halen TÜBİTAK MAM ve Pakistan arasında ikili işbirliği olarak yürüyen bir proje kapsamında CO₂'den metanol üretilmesine yönelik katalizör geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır. Bu kapsamda ilk katalizör örnekleri ortaya çıkmış, elde edilen ilk örnekler üzerinde performans testleri başlatılmıştır.

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Karbon dönüşüm şirketi Twelve, CO₂ elektrolizi ile E-Jet adı verilen ilk fosil türevli olmayan jet yakıtını üretmiştir. Bu proje, ABD Hava Kuvvetleri'nin (USAF) finansmanı ile desteklenmiş ve hem ticari hem de askeri havacılık için küresel olarak uygulanabilir bir yakıt üretilmiştir. Bu teknoloji, CO₂ elektrolizi ile CO üretimine dayanmaktadır. CO ve H₂ ile Fischer-Tropsch prosesi üzerinden sentetik yakıt üretilmektedir. Benzer şekilde CO ve H₂'den metanol üretiminin önünde de ticari uygulama açısından bir engel bulunmamaktadır.

Elektrokimyacılar yalnızca sentez gazını hedef almamaktadır. Amsterdam'da bulunan yenilenebilir bir kimya şirketi olan Avantium, CO₂'dan daha değerli kimyasallara dönüştürülebilir formik asit üretmek için geliştirilen katalizörler ile çalışmaktadır. CO₂'dan elektrokimyasal olarak formik asit üretim reaktörü, Almanya'da bir fosil yakıt santralinde test edilmektedir. Metanolün formik asit üzerinden üretimi de mümkündür.

Kanada'daki Toronto Üniversitesi, CO₂ ve suyu polimer yapımında yaygın olarak kullanılan etilen okside dönüştüren bir elektrokimyasal sistemi başarıyla test etmiştir. Geliştirilen katalizör üzerinde %35 Faradaik verim elde edilmiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Kimya, Kimya Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Proses Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, Çevre Mühendisliği başta olmak üzere çok disiplinli bir malzeme ve proses geliştirme ekibinin bir arada çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Endüstri 4.0 çağında Kimya, Gıda ve Enerji Sektörlerinde "Arz Güvenliği ve Dekarbonizasyon Stratejilerinin" öngördüğü yeni nesil Temiz Enerji-Yeşil Kimya teknolojileri artık "Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi" yöntemlerinin bu

süreçlere entegre edilmesini zorunlu kılmaktadır. Son yıllarda mevcut deneysel verileri analiz ederken çeşitli istatistiksel ve optimizasyon araçları ile birlikte makine öğrenmesi bir diğer değişle yapay zeka kullanılmaktadır. Bu kapsamda Bilgisayar Mühendisliği ile de disiplinler arası bir işbirliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırma üniversiteleri, araştırma merkezleri ve kimyasal üretim yapan özel sektör ve mühendislik tasarımları ve uygulamaları konusunda uzman özel sektör kuruluşlarının biraya gelmesi gerekmektedir. İlgili Bakanlıklar (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı) ve bu Bakanlıklara bağlı alt kuruluşların da bu çalışmalarını kontrol ve yönlendirme amacıyla projeleri takip etme konumunda bulunmaları beklenmektedir.

Araştırma üniversitelerinden THS:3-4 seviyesinde, araştırma merkezlerinden THS:4-6 seviyesinde ve özel sektör kuruluşlarından THS:6-9 seviyesinde katkı alınmalıdır.

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Elektrokimyasal ve kimyasal proseslerin entegre edilmesi için elektrokimya, heterojen katalizör ve proses entegrasyonu üzerine uzmanlıkları olan temel bilimcilerin ve mühendislerin bir arada çalışması gerekmektedir. Yeşil metanol üretiminin sivil sektörün yanı sıra savunma sanayinde de kullanımı için ilgili Bakanlıkların koordinasyonunda çalışmaların yapılması ve yeşil metanolün doğrudan alternatif yakıt olarak yada kerosene dönüştürülerek jet yakıtı kullanımı üzerine olanaklar değerlendirilmelidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Özel sektör kuruluşlarının teknoloji platformlarında rekabet öncesi işbirliği modeli ile birlikte çalışmaları önemlidir. Araştırma merkezleri ile üniversiteler arasındaki işbirliği ağının yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları başta olmak üzere bilim ve teknoloji araştırma odaklı bir çerçevede ilerlemesi önerilmektedir. Araştırma merkezi ve özel sektör kurumlarının da, ilgili Bakanlık ve bağlı alt kuruluşlarından mali destek alarak “ilk örnek-first of a kind” projelerinde pilot ölçek çalışmalarını yürütmesi gerekmektedir. Ayrıca pilot ve öncü tesis ölçeğinde çalışmaların yaygınlaşması için iklim değişikliği ile eylem planları çerçevesinde özel sektörü zorlayıcı regülasyonların çıkarılması ve uygulanmasının inovasyon sürecini hızlandıracağı değerlendirilmektedir.

Üniversite ve araştırma merkezi ortaklığında uluslararası özgünlüğü olan araştırma projelerinin desteklenmesi ve bu sayede teknolojik gelişmeyi mümkün kılacak bilgi ve tecrübenin kazanılması. Kimya sanayinin teknolojinin uygulanabilir olduğunu görmesi için gerekli olan fizibilite verilerinin elde edilmesi ve proses tasarımlarının yapılması amacıyla THS:4-6 seviyesinde üniversite-araştırma merkezi-özel sektör projelerinin proje bütçe sınırı konulmaksızın ve uluslararası özgünlük aranmaksızın desteklenmesi. Proje pilot ve öncü tesislerin kurulum projelerine mali destek verilmesi.

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Membran ve katalizör geliştirme, uygun cihaz tasarımı ve işletimi ve reaktör boyutlarını büyütme hedefleyen çalışmalar arz etmektedir. CO₂ elektrolizörünün üretim teknolojisinde kaydedilen ilerlemeler sayesinde maliyetler giderek düşmektedir. Standart bir modül boyutu kullanarak CO₂ elektroliz endüstrisinin, fotovoltaik ve pil sektörlerinde görülen üretim maliyeti düşüşlerini yakalayabileceği değerlendirilmektedir. Daha büyük ölçekli CO₂ elektrolizi, düşük maliyetli yenilenebilir elektriğin temin edilebilirliğine bağlıdır. Rüzgar, güneş ve jeotermal elektrik satın alma anlaşmaları ile ekonomik bir fiyat istikrarının oluşturulması önemlidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

4.2.a. Endüstriyel tesislerden veya havadan tutulan karbondioksitten ve yeşil hidrojenden metanol üretimine yönelik proseslerin ve katalizörlerin geliştirilmesi

Üniversite ve araştırma merkezi ortaklığında uluslararası özgünlüğü olan araştırma projeleri için 2-3 yıl süreli projeler

Kimya sanayinin teknolojinin uygulanabilir olduğunu görmesi için gerekli olan fizibilite verilerinin elde edilmesi ve proses tasarımı amacıyla THS:4-6 seviyesinde üniversite-araştırma merkezi-özel sektör projeleri: 2-3 yıl

Proje pilot ve öncü tesislerin kurulum projeleri ve saha verilerinin elde edilmesi: 3-4 yıl

Öncü tesislerde üretilen metanolün ithal metanole göre pazarda daha avantajlı olması için vergi avantajları sağlanması, yenilenebilir metanol üretimini kolaylaştırıcı hammadde tedarik kolaylıklarının sağlanması gibi destek mekanizmalarının belirlenmesine yönelik politika geliştirme projeleri: 1-2 yıl

Biyokütle beslemeli bir tesis için yatırım maliyeti aralığının 1560-2220 USD/t/yıl ve belediye katı atık bazlı projeler için 2000-2780 USD/t/yıl olduğu varsayılmaktadır. Yılda 10.000 ton

biyometanol üretimi yapacak bir öncü tesis projesi için 15 ile 30 milyon dolarlık bir yatırıma ihtiyaç olacağı düşünülmektedir.

Bu kapsamda araştırma projeleri, pilot tesis ve öncü tesis çalışmaları için toplamda ticari uygulama dahil mavi/yeşil metanol üretim teknolojilerinin tamamı için 40-50 milyon dolarlık bir bütçenin ayrılmasının yeterli olabileceği değerlendirilmektedir.

4.2.b. Karbondioksitten elektrokimyasal indirgeme yöntemiyle metanol üretimi

Düşük sıcaklık CO₂ elektrolizörlerinin geliştirilmesi için orta vadeli (3-4 yıl) uygulamalı Ar&Ge projelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

CO₂ elektrolizi ile CO üretimi, PEM elektrolizi hidrojen üretimi ve CO&H₂'den CO₂ salımsız yenilikçi metanol üretim proseslerinin entegre edileceği teknoloji vadilerinin kurulması için uzun vadeli Ar&Ge ve Ür&Ge çalışmaları (5-7 yıl)

Bu kapsamda araştırma projeleri, pilot tesis ve öncü tesis çalışmaları için toplamda ticari uygulama dahil mavi/yeşil metanol üretim teknolojilerinin tamamı için 20-30 milyon dolarlık bir bütçenin ayrılmasının yeterli olabileceği değerlendirilmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Öncü tesislerde üretilen metanolün ithal metanole göre pazarda daha avantajlı olması için vergi avantajları sağlanması, yenilenebilir metanol üretimini kolaylaştırıcı hammadde tedarik kolaylıklarının sağlanması gibi kolaylaştırıcı düzenlemelere ihtiyaç vardır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Emisyonlarla ilgili yeni mevzuatlar, karşılanması gereken teknolojik zorlukları yaratmakta ve bu durum yenilenebilir metanol dahil olmak üzere alternatif yakıtlar için yeni pazarlar ve fırsatlar açmaktadır. Avrupa'nın ilk biyoyakıt politikası 2003 yılında ilan edilmiştir ve 2010 için konvansiyonel yakıtlara biyoyakıt harmanlama hedefleri belirlenmiştir. Bu politika, 2020 için ulaşımda %10 yenilenebilir enerji yükümlülüğü getiren Yenilenebilir Enerji Direktifi'ne (RED) 2009 yılında entegre edilmiştir. 2018'de Avrupa Parlamentosu, Konsey ve Komisyon, 2030 yılına kadar ulaşımda %14 yenilenebilir enerji kullanılmasını gerektiren Yenilenebilir Enerji Direktifi II (RED II) üzerinde anlaşma sağlamışlardır. RED II, etanol ve biyodizel gibi geleneksel biyoyakıtlar ve özellikle atıklardan, artıklardan veya yenilenebilir elektrikten üretildiğinde yenilenebilir metanol gibi alternatif biyoyakıtlar için yeni pazarlar yaratmaktadır. Diğer Avrupa

politikaları da potansiyel yenilenebilir metanol pazarını etkilemektedir: Örneğin Yakıt Kalitesi Direktifi, Alternatif Yakıt Altyapısı Direktifi ve Hava Kalitesi Direktifi ve diğerleri. ABD, 1992'de Enerji Politikası Yasası ile ilk biyoyakıt politikasını uygulamaya koymuştur. Yasanın amacı, petrol ithalatına olan bağımlılığı azaltmak, enerji güvenliğini artırmak ve sürdürülebilirliği geliştirmek olarak özetlenebilir. Amerika Birleşik Devletleri 2007'de, her yıl ulusal ulaşım yakıt tedarikinde belirli bir oranda biyoyakıt kullanılmasını gerektiren Yenilenebilir Yakıt Standardı'nı (RFS) uygulamaya koymuştur. Toplam yenilenebilir yakıt gereksinimi, dört ayrı - ancak iç içe geçmiş - kategoriye ayrılmıştır. Bunlar: toplam yenilenebilir yakıtlar, gelişmiş biyoyakıtlar, biyokütle bazlı dizel ve selülozik etanol. Her birinin kendi gereksinimleri bulunmaktadır. Alternatif bir yakıtın gelişmiş biyoyakıt kategorisinde değerlendirilmesi için yaşam döngüsünde sera gazı emisyonlarını %50 azaltması gerekmektedir. Selülozik ve tarımsal atık temelli biyoyakıt alt kategorisinde değerlendirilmesi için ise yaşam döngüsünde sera gazı emisyonlarını en az %60 azaltması beklenmektedir. Toplamda 66 ülke alternatif yakıtlar üzerine hedefler veya zorunlulukları yürürlüğe sokmuştur. AB-27'nin yanı sıra, Amerika kıtasında 14 ülke, Asya Pasifik'te 12 ülke, Afrika'da 11 ve Avrupa'da AB üyesi olmayan 2 ülke, %15 ila %27'ye varan oranlarda olmak üzere, biyoyakıt benimseme politikalarını uygulamaya başlamıştır.

Metanol, benzinle karıştırılabilir ve Avrupa yakıt standardına göre her litre benzinin %3'e kadar metanol içermesine izin verilmektedir. Benzin içinde %15 metanol karışımları Çin'de halihazırda kullanılmaktadır. Metanol-benzin karışımları Avustralya, İtalya, Hindistan ve İsrail'de test edilmektedir. Hafif araçlarda, otobüslerde ve kamyonlarda %100 metanol kullanımı Çin'de teşvik edilmektedir.

Ülkemizde de 30098 Sayılı ve 16 Haziran 2017 Tarihli Resmi Gazetede yer alan "Motorin Türlerine Biodizel Harmanlanması" mevzuatına göre: "Dağıtıcı lisansı sahipleri tarafından, bir takvim yılı içerisinde, ithal edilen ve kara tankeri dolun üniteleri hariç rafinericiden temin edilen motorininin toplamına, en az %0,5 (V/V) oranında yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biodizelin harmanlanmış olması zorunludur."

Biyodizel gibi biyoetanol, biyometanol, biyodimetileter biyoyağlar ve biyoettersiyerbutileter de petrol ikamesi sıvı biyoyakıtlar olarak tanımlanmaktadır.

28100 sayılı ve 30 Ekim 2011 tarihli Resmi Gazetede yayımlanan "Etil Alkol Ve Metanolün Üretimi İle İç Ve Dış Ticaretine İlişkin Usul ve Esaslar Hakkında Yönetmeliğine" göre metanol üretimine ilişkin talepler Tütün ve Alkol Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından değerlendirilmektedir. Bilimsel ve teknolojik araştırmalar yapan kurum ve kuruluşların, deneme niteliğindeki pilot tesislerine ilişkin talepleri de Kurulun değerlendirmesine tabidir.

Teknik Altyapılar

Ülkemizde alternatif yakıtların motor emisyon ve performans testlerinin yapılabileceği alt yapılar mevcuttur. Talep fazlası yenilenebilir elektriğin sanayi tesislerine iletimi konusunda mevcut durumun gözden geçirilmesi gerekmektedir. Kimyasal olarak metanol üretimi Tütün ve Alkol Piyasası Düzenleme Kurumu'nun iznine tabidir. Alternatif yakıt olarak metanol üretimi için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun metanolün ulaştırma sektöründe kullanımı ile ilgili düzenlemelerin oluşturulmasına yönelik düzenlemeleri AB ile uyum mutabakatı kapsamında oluşturması önem arz etmektedir.

İnsan Kaynakları

Üniversite ve araştırma merkezlerinde yenilenebilir metanol üretiminin en kritik bileşeni olan katalizör konusunda uzmanlığa sahip insan kaynağı mevcuttur. Katalitik proseslerin sanayi uygulamalarında ise sanayi ölçeğinde katalizör üretimi konusunda uzmanlıkların sanayi tarafında desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Destek ve Teşvikler

Örneğin yenilenebilir elektriğin yenilenebilir metanol üretim tesislerine iletim hatlarının devlet tarafından kurulması, yenilenebilir elektrik üretim teşviklerinden bu elektriği kullanan sanayinin de faydalanması için gerekli mevzuatların oluşturulması vb. gibi mevzuatların oluşturulması yönünde teknoloji destekleme politikaları geliştirilebilir.

Kaynaklar

1. Charlie Hobson, Carlos Márquez (editor), Renewable Methanol Report, Methanol Institute (2018), www.methanol.org
2. International Renewable Energy Agency (IRENA), Innovation Outlook Renewable Methanol, (2021) www.irena.org ISBN 978-92-9260-320-5
3. R. Kajaste, M. Hurme, P. Oinas, Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base, AIMS Energy. 6 (2018) 1074–1102. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.6.1074>.
4. T. Chmielniak, L. Stepien, M. Sciazko, W. Nowak, Effect of pyrolysis reactions on coal and biomass gasification process, Energies. 14 (2021) 1–20. <https://doi.org/10.3390/en14165091>.
5. <https://www.carbonrecycling.is/products>
6. Etim UJ, Song Y, Zhong Z. Improving the Cu/ZnO-Based Catalysts for Carbon Dioxide Hydrogenation to Methanol, and the Use of Methanol As a Renewable Energy Storage Media. Frontiers in Earth Science 2020;8:239. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2020.545431/BIBTEX>.

7. Guil-López R, Mota N, Llorente J, Millán E, Pawelec B, Fierro JLG, et al. Methanol Synthesis from CO₂: A Review of the Latest Developments in Heterogeneous Catalysis. *Materials* 2019, Vol 12, Page 3902 2019;12:3902. <https://doi.org/10.3390/MA12233902>.
8. D. Sheldon, Methanol production - A technical history, *Johnson Matthey Technol. Rev.* 61 (2017) 172–182. <https://doi.org/10.1595/205651317X695622>.
9. D. Zhang, M. Martella, M. Martella, G.H. Pham, M. Zhu, Z. Zhang, Miniaturised Methanol Production as Hydrogen Carrier from Biomass Pyrolysis Syngas Mid-term Activity Report, Centre for Energy, The University of Australia, 2020. <https://arena.gov.au/assets/2021/03/miniaturised-methanol-production-as-hydrogen-carrier-from-biomass-pyrolysis-syngas-october-2020.pdf>
10. P. Styring, E.A. Quadrelli, K. Armstrong Carbon Dioxide Utilisation Closing the Carbon Cycle, Elsevier, ISBN: 978-0-444-62746-9
11. E. L. Stephens, roadmap on low temperature electrochemical CO₂ reduction, *J. Phys. Energy*, 4, (2022) 0420032022
12. S. Zhang, X. Jing, Y. Wang, F.Li, Towards Carbon-Neutral Methanol Production from Carbon Dioxide Electroreduction *ChemNanoMat* 7 (2021) 728 –736
13. J.A. Rabinowitz, M.W. Kanan, The future of low-temperature carbon dioxide electrolysis depends on solving one basic problem, *Nature Communications* (<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19135-8>)
14. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-00807-y>

Teknolojik Hedef 5:

**YEŞİL KİMYASALLAR (ESTERLER, OLEOKİMYASALLAR,
EPOKSİLER GİBİ) VE SENTETİK YAKITLAR**

*Ülkemiz kimya sektörünün ihtiyaç duyduğu ara kimyasalların üretim
proseslerinin yeşil ve sürdürülebilir yaklaşımlarla iyileştirilmesi*

Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.

5.1. Esterleşme proseslerinin minimum enerji ile ve sürdürülebilir hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi**
- 5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar**
- 5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi**

Kritik Ürün/Teknoloji 5.1.

5.1. Esterleşme proseslerinin minimum enerji ile ve sürdürülebilir hammaddeler kullanılarak gerçekleştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

AB Yeşil Mutabakatı çerçevesinde hem karbon ayak izini hem de doğa dostu biyolojik parçalanabilir esterleri sürdürülebilir olarak üretmek büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle yeşil ester üretimlerinde doğal hammaddelerin (bitkisel ve hayvansal yağlar ve yağ asitleri, fermente asitler) girdi olarak kullanılması ve ilgili proseslerin minimum enerji sarfiyatı ile yürütmesi gerekli olmaktadır. Bu ise transesterifikasyon ve esterifikasyon reaksiyonlarının mümkün olan en düşük sıcaklıklarda yürütülmesi ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla uygun katalizörlerin esterleşme reaksiyonlarında kullanımı ve prosesin, ayırma, ürün verimi (% dönüşüm), reaksiyon süresi vb. gibi parametreler açısından optimizasyonu gerekmektedir.

Ülkemizde metal işleme sıvıları, plastik - PVC vd. - , kozmetik ve gıda vb. gibi çok çeşitli sektörlerde esterler girdi olarak kullanılmaktadır. Bu esterlerden özellikle yeşil esterler ithalatta karşılanmaktadır, üretimleri yapılanların ise şu anki üretim prosesleri ile AB Yeşil Mutabakatı kriterlerine uyması zordur. Bu nedenle hem ithalatın azaltılması hem de AB kriterlerine uyan düşük enerji kullanımlı ve yeşil katalizör girdili ester üretim proseslerine ihtiyaç vardır.

Şu an ülkemizde çeşitli esterler, farklı sektörler için konvansiyonel proseslerle üretilmektedir. Bu esterlerin bir kısmı yeşil kimyasal niteliğinde değildir ve zaten genelde yoğun enerji kullanımları ve kullanılan katalizörlerin - yeşil - özellikte olmaması nedeniyle bu konvansiyonel proseslerin bugünkü halleri ile AB Yeşil Mutabakatı kriterlerini karşılamaları zordur.

Bilimsel araştırmalardaki olağanüstü gelişmelere kıyasla kimya sanayiinde uygulanmakta olan üretim proseslerinin daha klasik olduğu ve kimya sanayiinin bilimsel gelişmelerden faydalanma hususunda yavaş olduğu söylenebilir. Bu durumun sebepleri, yeni teknolojilerin teknolojik bakımdan fizibil olmaması ve/veya tedarikle ilgili kısıtlayıcı regülasyonlar/yönetmelikler gibi global konular olabildiği gibi, özel olarak da ülkemiz kimya sanayiinin Ar-Ge ve yenilik ekosisteminin yeterince gelişmemiş olmasıdır. Ancak, çevresel sorunlar günümüzde sadece kimya değil bütün sektörlerin çevre dostu sürdürülebilir üretim teknolojilerine geçmesini zorunlu kılmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Yağlardan transesterifikasyon ve yağ asitlerinden esterifikasyon ile ester üretimlerinde katalizörler kullanılmaktadır. Kullanılan katalizörlerin neredeyse tamamı homojen tip (yağ fazda çözünür) olup yeşil nitelikte değildir.

Karboksilli asitlerin alkollerle esterleşme reaksiyonları için genelde bir çok küçük molekül ağırlıklı organik moleküllerin (organokatalizörlerin) katalizör olarak kullanıldığı homojen sistemler tanımlanmıştır. Söz konusu katalizörler verim ve reaktör gereklilikleri vb. bakımdan birçok pratik avantaj sunmaktadır. Ülkemizde de yerli ester üretim proseslerinde halen kullanılan katalizörler genelde homojen nitelikte olup doğa dostu değildir ve büyük çoğunluğu ithalat ile sağlanmaktadır. Bu nedenle özellikle kozmetik ve gıda sektörlerinde katkı olarak kullanılan esterlerin üretiminde toksik etkiye sahip olmayan homojen - yeşil (food grade) katalizörlere ve biyokatalizörlere (enzimler) ayrıca mümkünse reaksiyon sonunda basit bir süzme işlemi ortamdan ayrılabilen yine yeşil özellikte heterojen (gözenekli katı faz) katalizörlere ve bunların ülkemizde geliştirilip üretimlerine ihtiyaç vardır.

Halen ülkemizde ester üretiminde; genellikle reaksiyon sonrası ürünün içinde kalan her ne kadar katkı miktarları çok düşük (kütüce % 0,2 - 0,5) olsa da bazıları toksik etkiye sahip ithal homojen katalizörler kullanılmaktadır. Bu husus boya, plastik -PVC vd.-, metal işleme sıvıları vb. sektörlerde pek sorun olmasa da özellikle gıda ve kozmetik sektörü için önemlidir. Bu sorun yeşil nitelikte doğa dostu – food grade homojen, biyolojik ve heterojen katalizörlerin geliştirilip kullanılmasıyla çözülebilir.

Esterleşme reaksiyonlarında hedeflenmesi gereken yenilikçi özellikler ve performans kriterleri:

- 1) Mevcut kimyasal üretim proseslerinde kullanılan organik çözücülerin yerine daha çevreci ve sürdürülebilir çözücülerin kullanılması
- 2) Mevcut ester üretim proseslerinin mümkünse heterojen katalitik proseslere dönüştürülmesi.
- 3) Metal katalizör kullanılan sistemler yerine, mümkün olan durumlarda, organik katalizörlerin (organokatalizörlerin) kullanıldığı proseslere geçilmesi.

Yeni kimyasal üretim teknolojilerinin kullanımı:

- 1) Daha yüksek verim verebilecek reaktör tasarımlarının yapılması
- 2) Çözücüsüz ya da konsantre koşullarda çalışılabilen kimyasal üretim proseslerinin geliştirilmesi

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Esterlerin üretiminde doğal kaynaklı bitkisel (ayçiçek yağı, kanola yağı, fındık yağı, hint yağı vb.) ve hayvansal (tripalmitin, tristearin ve karışımları vb.) kökenli yağlar ve/veya bu yağların asit formları (oleik asit, risinoleik asit, palmitik asit, stearik asit vb) ile fermente organik asitlerin (asetik asit, laktik asit, sitrik asit vb.) kullanımı tercih edilmelidir. Ayrıca esterleşme reaksiyonlarında yine girdi olarak kullanılacak alkollerin (etil alkol, butil alkol, gliserol vb.) de doğa dostu olması önemlidir. Bu konuda ilgili firmaların Ar-Ge Merkezlerinde ve bazı üniversitelerimizde yürütülen çalışmalar vardır.

Esterleşme reaksiyonları sonucu elde edilen her türlü esterin toksik olmayan doğada bozunur yeşil ester olması için üretimlerinde kullanılan yağların, yağ asitlerinin ve mümkünse alkollerin yukarıda açıklandığı gibi doğa dostu olmalarına gereksinim vardır. Aksi takdirde elde edilen esterlerin doğada bozunur - yeşil ester- olması ihtimali düşüktür.

Şu an boya sektörümüzde dağıtıcı (dispersant) ve plastik- PVC vd.- sektörümüzde de plastifiyan olarak yoğun kullanılan doğa dostu olmayan ve halen ülkemizde üretilen çeşitli esterler (DOP, DEHP, DPHP gibi) mevcuttur. Bunların yerine yukarıda tanımlanan ikame biyo-bozunur yeşil esterlerin geliştirilip ülkemizde üretilmesiyle kimya sektörümüz AB Yeşil Mutabakatı' na uyum konusunda yol alacaktır.

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Şu an ülkemizde ester üretiminde genelde yağ/ yağ asiti veya alkolde çözünen homojen katalizörler kullanılmakta ve bunlar sonuçta nihai ürün - ester - içinde kalmaktadır. Kullanılan bu homojen katalizörler gıda uyumlu (food grade) değilse bu esterlerin gıda ve kozmetik sektörlerinde katkı olarak kullanımı mümkün olmamaktadır.

Diğer çözülmesi gereken bir konu; özellikle fermente organik asitlerin (asetik asit, laktik asit, sitrik asit vb) alkoller ile (metil alkol, etil alkol vb.) verdiği esterifikasyon reaksiyonlarında oluşan

suyun ortamdaki klasik toluen/ ksilen azeotrop sistemi ile uzaklaştırılmaması ve reaksiyonun istenen düzeyde yürütülebilmesidir. Bu nedenle reaksiyon sırasında oluşan suyun veya ürün esterinin ortamdaki uzaklaştırılması için reaktöre entegre bir ayırma sistemine gereksinim vardır. Zayıf organik asitlerle fermente alkollerin esterifikasyonu ile doğa dostu esterlerin (çözücülerin) eldesinde reaksiyon sırasında oluşan suyun veya ürünün ortamdaki uzaklaştırılması için reaktöre “Reaktif Distilasyon” ayırma ünitesi entegrasyonu yapılmalıdır. Bu ünitenin reaksiyon sistemine göre tasarlanıp sisteme entegre edilmesiyle yüksek verimde yeşil ester üretimi mümkün olacaktır.

Esterleşme reaksiyonlarında homojen katalizörlerin yerine; reaksiyon sonunda basit şekilde (süzme, çökeltme vb.) ortamdaki ayrılabilir katı- gözenekli heterojen katalizörlere ve bunların kullanımına ihtiyaç vardır. Bu şekilde ester üretiminde gözenekli katı heterojen katalizörler kullanıldığında; reaksiyon bitiminde katı katalizörler basit bir ayırma - örneğin süzme - işlemi ile ortamdaki uzaklaştırılabilir. Bu şekilde ürünün katalizörle kontaminasyonu engellenecek ve elde edilen ester kozmetik ve gıda sektörlerinde güvenilir şekilde kullanılacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

(Mümkünse Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Projeleri temelinde)

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Yeşil katalizörlerin geliştirilmesi ile ilgili dünyadaki ve Türkiye’deki Teknolojik Hazırlık Seviyeleri (THS) aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir.

(Not-1: Üniversitelerin, Ar&Ge merkezlerinin ve üretim firmalarının sahip oldukları THS’leri birbirinden farklı olduğundan dünyada ve Türkiye’de; tek bir THS işaretlemek yerine mevcut THS aralığının işaretlenmesi tercih edilmiştir.)

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

THS 5	✓	<input type="checkbox"/>
THS 6	✓	<input type="checkbox"/>
THS 7	✓	<input type="checkbox"/>
THS 8	✓	<input type="checkbox"/>
THS 9	✓	<input type="checkbox"/>

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Bu konuda dünyadaki ve Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyeleri (THS) aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	✓
THS 5	<input type="checkbox"/>	✓
THS 6	<input type="checkbox"/>	✓
THS 7	✓	✓
THS 8	✓	<input type="checkbox"/>
THS 9	✓	<input type="checkbox"/>

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Bu üretimlerle ilgili dünyadaki ve Türkiye'deki Teknolojik Hazırlık Seviyeleri (THS) aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir.

(Not-1: Üniversitelerin, Ar&Ge merkezlerinin ve üretim firmalarının sahip oldukları THS' leri birbirinden farklı olduğundan dünyada ve Türkiye'de; tek bir THS işaretlemek yerine mevcut THS aralığının işaretlenmesi tercih edilmiştir.)

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	✓
THS 3	<input type="checkbox"/>	✓
THS 4	<input type="checkbox"/>	✓
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	✓	<input type="checkbox"/>
THS 7	✓	<input type="checkbox"/>
THS 8	✓	<input type="checkbox"/>
THS 9	✓	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Dünyada çeşitli ülkelerde (Almanya, ABD, Çin, Rusya vd.) yeşil katalizör çalışmalarını hem üniversitelerde hem de katalizör firmalarında görmekteyiz. THS' de Ticarileşmiş yeşil katalizör üretimleri olan bazı firmalar şunlardır:

BASF Catalysts, Chempack, Green Catalysts, Fastcat Catalysts PMC & Organometallix, Rasayanika gibi.

Türkiye'de ise özellikle gelişmiş üniversitelerimizin kimya- malzeme mühendisliği ve kimya bölümlerinde THS:2-5 seviyelerinde Ar-Ge çalışmaları olduğu öngörülmektedir. Ayrıca Ege Kimya A.Ş. nin katalizör temini konusunda ticari ölçekte bazı çalışmaları olduğu bilinmektedir. Ancak endüstriyel büyük ölçekli ester üretimlerinde genellikle homojen katalizörler kullanılmaktadır.

Bu konuda çalışmalar halen yoğun bir şekilde sürmektedir, henüz dünyaya mal olmuş üretimde kullanılan çok başarılı bir girişim ve örnek vermek zordur.

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Dünyada THS:7-9 seviyelerinde ticari alanda yeşil ester üretimi yapan firmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları: Victorian Chemical Company (Vicchem), Evonik Industries, Oleon NV, Bellini SPA, Acme-Hardesty, Natur-Tec, BASF. Bu şirketler başarılı girişim ve örnek olarak dikkati çekmektedir.

Türkiye’de ise; THS:5-9 seviyelerinde biyo-ester üretimi yapıp iç ve dış pazarlara satış yapan CHS Endüstriyel Ürünler, 3-S Mühendislik, Green Chemicals, Adokim, Kiraz Grup, May Grup, Petroyağ firmaları örnek olarak verilebilir.

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Bu konuda dünyada özellikle THS:7-9 düzeylerinde ester yapısında yeşil çözücü (green solvent) ve organik asit tuzlarını üreten Galactic (ABD- Belçika) ve Liberty (İtalyan) gibi şirketler yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerini geliştirerek uygulamaya koymuşlardır. Türkiye’de ise metil- ve etil asetat üretimlerinde aynı THS düzeylerinde (7-9) benzer şekilde yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerini kullanan Adokim ve Kiraz Grup şirketlerini görmekteyiz.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için;

Kimyager (hesapsal kimya, organik sentez, inorganik sentez, homojen ve heterojen kataliz konularında uzman)

Kimya mühendisi (reaksiyon mühendisi, reaksiyon kinetiği, fizibilite konularında uzman)

Malzeme mühendislerinin (morfolojik yapı analizi konusunda uzman) birarada bulunması ve ilaç, petro-kimya, boya, ester üretimi vb. sektörlerinden uzmanların bir arada çalışması gerekmektedir.

Ar-Ge ve yenilik süreçlerinde üniversitelerin kimya, kimya mühendisliği, malzeme mühendisliği, biyoloji- biyoteknoloji disiplinleri ve ilgili özel sektörlerin Ar-Ge merkezleri bir araya gelmelidir.

Bu çalışmalar Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kuruluşlar tarafından proje olarak desteklenmelidir.

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Esterleşme prosesleri ile ilgili olarak Ar-Ge ve yenilik süreçlerinde üniversitelerin kimya ve kimya mühendisliği disiplinleri ile bitkisel rafine yağ endüstrisi ve ester üretici firmaların Ar-Ge merkezleri bir Ar&Ge ve Teknoloji platformunda ortak çalışmalar yapmalıdır. Bu tür kapsamdaki çalışmalar Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kuruluşlar tarafından teşvik edilmeli ve proje olarak desteklenmelidir.

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Bu konu ile ilgili olarak Ar-Ge ve yenilik süreçlerinde üniversitelerin kimya ve makine mühendisliği bölümleri ile etil alkol ve ester üretici firmaların Ar-Ge merkezleri bir araya gelmelidir. Bu çalışmalar Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kuruluşlar tarafından teşvik kapsamında koordine edilmeli ve proje olarak desteklenmelidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Bu konuda ilgili kamu ve özel sektör küçük / orta / büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinde oluşturulacak bir platformda bir araya gelerek işbirliği yapmalıdırlar.

Kamu destekleri, üniversite ve sanayi işbirliği kapsamında oluşturulacak platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılmalı ve kamu ve özel sektörde desteklenecek projeler şeklinde olmalıdır.

Öncelikle ayrı-ayrı projeler, sonrasında iyi en etkin sonuçların alındığı projeler üzerinden eşgüdüm içinde platform projeleri vb. ayrı-ayrı başvurular alınıp, değerlendirme sürecinden sonra eşgüdüm içinde platform projelerinin de oluşturulmasında yarar vardır.

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Orta / büyük ölçekli üretici firmalar ile ilgili tedarikçiler Ar-Ge ve Yenilik Projelerinde bir araya gelerek işbirliği yapmalıdırlar.

Destek mekanizması, üniversite ve sanayi işbirliği kapsamında oluşturulacak büyük bir platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılmalı ve kamu ve özel sektörde desteklenecek projeler şeklinde olmalıdır.

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Orta / büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinde bir araya gelerek işbirliği yapmalıdırlar.

Destek mekanizması, üniversite ve sanayi işbirliği kapsamında büyük bir platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılacak ve kamu ve özel sektörde desteklenecek projeler şeklinde olmalıdır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

5.1.a. Yeşil katalizörler (homojen, heterojen ve biyokatalizör) geliştirilmesi

Ar-Ge süresi: Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularının gerçekleştirilmesi için orta vade (3-5 yıl) yeterli olacaktır. Bu kritik ürünlerin geliştirilmesi için orta vade hedeflenmelidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı toplam 20 Milyon TL ve Demonstrasyon- Pilot üretim için 20 Milyon TL ve tek Yatırım için 40-60 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

5.1.b. Esterleşme prosesinde doğa dostu hammaddelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar

Bu kritik ürünlerin geliştirilmesi için Ar-Ge basamağı dahil orta vade (3-5 yıl) hedeflenmelidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı ve Demonstrasyon- Pilot üretim için birlikte 30 Milyon TL ve tek Yatırım için 40 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

5.1.c. Ester üretiminde daha verimli ve yeşil ayırma ve saflaştırma proseslerinin geliştirilmesi

Bu proseslerin geliştirilmesi için Ar-Ge basamağı dahil orta vade (3-5 yıl) hedeflenmelidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı ve Demonstrasyon - Pilot üretim için birlikte toplam 30 Milyon TL ve tek Yatırım için 35 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Belirlenen konuların yapılabilmesi için kamu; üniversitelere ve özel sektör Ar-Ge merkezlerine proje, pilot tesis kurulumu ve yatırım kademesinde ise özel sektöre çeşitli destek mekanizmaları ile yardımcı olmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Halihazırdaki mevzuat genel olarak teknolojik ilerlemeye imkan tanımaktadır. Ancak destek mekanizmalarının hızlı ve etkin çalışabilmesi ve sonuçta başarılı olması bürokrasinin daha hızlı çalışmasına ve Ar-Ge, demo/ pilot tesis şeklindeki uygulama ve yatırım desteklerinde kamunun öngörülen takvimlere uymasına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle için ilgili mevzuatta bunu sağlayıcı ek tedbirlere yer verilmesinde büyük yarar vardır.

Teknik Altyapılar

Hem üniversitelerde, hem kamuda örneğin TÜBİTAK- MAM' da hem de yetkin Ar-Ge Merkezlerine sahip özel sektörde üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı genel olarak mevcuttur. Ancak özellikle sanayi Ar-Ge Merkezlerinde çalışan yüksek lisans ve doktora dereceli elemanların sayısı gereken düzeyde değildir. Bu nedenle özel sektöre Ar-Ge Merkezlerinde sayıca bir oran dahilinde bu nitelikte elemanların görevlendirilmesine yönelik zorlayıcı koşulların getirilmesinde yarar vardır (Örneğin talep edilen desteğin sağlanması için; sunulan projenin kapsam ve bütçesine bağlı olarak gereken minimum yüksek lisans ve doktora dereceli eleman sayısı oranının zorunlu olması gibi).

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım teşvik ve desteklerinin çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Bu tür yatırımlarda ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle üretimi gerçekleştirecek firmalara yeterli devlet yatırım teşvikleri (Makine – teçhizat ithalatında gümrük vergisi istisnası, başlangıçta düşük gelir vergisi, düşük SGK primi, KDV muafiyeti vb. hatta makine -teçhizat için belirli % de hibe vb. gibi) verilmelidir. Aynı zamanda bu yerli imkanlar ile üretilecek doğada bozunur yeşil esterleri proseslerinde kullanan şirketlere de çevreye karşı duyarlı davrandıkları için bazı dolaylı teşvikler verilebilir.

Yeşil esterlerin üretiminde hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin yukarıda açıklandığı gibi çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Kritik Ürün/Teknoloji 5.2.

5.2. Plastik sektörü için plastifiyan ve alev geciktirici üretimi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.2.a. Doğa dostu olmayan plastifiyanlara alternatif olarak çoklu alkollerin katı yağ asitleri ve/veya biyoteknolojik yöntemle elde edilen çoklu asitler ile oluşturdukları esterlerin ve ayrıca halojenli alev geciktiricilere alternatif olarak bazı esterlerin üretimi

Kritik Ürün/Teknoloji 5.2.

5.2. Plastik sektörü için plastifiyan ve alev geciktirici üretimi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

AB Yeşil Mutabakatı her türlü kimyasal ürünün minimum karbon ve su ayakizi ile üretimini ve sonuçta doğaya uyumlu/ doğada parçalanabilir olmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda plastiğe kolay işleme imkanı ve esneklik sağlayan plastifiyanlar ile plastik mamullerin yanmasını geciktirici katkıların bu özelliklerde olması gereklidir.

Plastifiyanlar;

Ftalat esaslı plastifiyanlar özellikle endüstride % 80- 90 olarak kullanılan en önemli plastifiyan grubudur. Bunlardan plastik ve kauçuk sektörü için en yaygın kullanılanları DOP, DEHP, DPHP ürünleridir. Bu ürünlerin kullanılmasının sebebi petro kimyasal esaslı polimerler ile uyumlu olmaları ve üretim kolaylığı sağlamalarıdır. İnsan sağlığına ve çevreye zararlı ftalat türevli plastifiyanların yerine alternatif çevreci ürünlerin kullanılabilmesi için bunların öncelikle polimer ile uyum içinde bulunması gerekir. Ayrıca, polimerin işlenebilirliğini arttırması ve camsı geçiş sıcaklığını düşürüp daha esnek bir polimer haline getirmesi plastifiyanın verimliliği açısından önemlidir. Mevcut ticari plastifiyanları yeşil plastifiyanlarla değiştirmek için hem biyo-transformasyon mekanizmalarının hem de plastikleştirme kabiliyetini etkileyen önemli fonksiyonel grupların belirlenmesi yeşil plastifiyanların kullanımı için önemlidir. Biyo esaslı plastifiyanların en önemli avantajı neredeyse yüzde yüz yenilenebilir kaynaklardan yapılmış olmasıdır.

Alev Geciktiriciler;

Yaygın olarak kullanılan alev geciktiricilerin yapısında yer alan halojen esaslı aktif gruplar hem insan sağlığı hem de çevre için zararlı bileşiklerdir. Bunlara alternatif olarak halojen içermeyen alev geciktiriciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir diğer çevreci ürün ise biyo esaslı alev geciktiricilerdir. Ancak bu ürünlerin ticari olarak kullanılması henüz yaygın değildir.

Biyo esaslı alev geciktiriciler, alev geciktirici formülasyonlar dünyasında paylarını gün geçtikçe arttırmaktadır. Sürdürülebilir halojen içermeyen alev geciktiriciler, çeşitli endüstriyel uygulamalar için türetilmiştir. Buna ilaveten akademik olarak yenilenebilir kaynaklardan polimerler için önemli biyo esaslı katkı maddeleri üretilmiştir. Biyo esaslı alev geciktiriciler, yanma yüzeyinde kömür oluşturarak alevi geciktirir. Isı emici olarak hizmet etmek üzere

oluşturulan kömürler, malzemenin kütlesine ısı transferini önler. Biyo esaslı alev geciktiriciler genel olarak yeryüzünde bulunabilen biyolojik madde olarak tanımlanan biyokütleden elde edilebilen veya türetilen bileşikler ifade etmektedir. Bitki hayvan ve mikroorganizma kökenli maddeleri içerir. Azalan düzende sıralandığında en çok kullanılabilen; karbon, hidrojen, azot, kalsiyum, silikon, magnezyum, alüminyum, kükürt, demir, fosfor, klor, sodyum, mangan ve titanyum ve bunların bileşikleridir.

Biyo esaslı alev geciktiriciler aşağıda yer aldığı şekilde sıralanabilir;

- 1- Karbonhidratlar: Nişasta, selüloz, hemiselüloz, kitosan, alginat.
- 2- Fenolik bileşikler: Lignin, taninler
- 3- Protein bileşikler: Kazein, yumurta kabuğu
- 4- Fitik asit
- 5- Yağlar: Soya fasülyesi yağı (soybean oil), hint yağı (castor oil), jojoba yağı

Ticari olarak daha yaygın kullanılanlar halojensiz alev geciktiricilerdir. Halojensiz alev geciktiriciler, üretim sürecinin herhangi bir aşamasında fiziksel karıştırma yoluyla (katkı alev geciktiriciler) polimer matrisine eklenebilir veya polimerlere kimyasal olarak eklenebilir, bu da onları polimerik yapının kalıcı bir parçası yapar (reaktif alev geciktiriciler).

Halojensiz alev geciktiricilerin türlerine göre aşağıda yer aldığı şekilde sıralanmaktadır;

- 1- Alüminyum trihidroksit (ATH)
- 2- Orgonafosforlar: fosfor içeren alev geciktiriciler
- 3- Diğer Halojensiz Alev geciktiriciler: Azot, çinko, boron, magnezyum

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

Plastik sektöründe DEHP, DOP ve DPHP gibi doğa dostu olmayan plastifiyanların yerine kullanılacak gliserin, etilen glikol, PEG, pentaeritrol vb. çoklu alkollerin bazı doğal katı yağ asitleri (stearik asit, palmitik asit vb.) ve biyolojik kökenli malzemelerden elde edilebilen süksinik asit, fumarik asit, maleik asit gibi organik asitlerle oluşturdukları esterlere (dioktil süksinat, fumaratlar, maleatlar vb) ihtiyaç duyulmaktadır. Çünkü bu tür esterler doğada parçalanabilir nitelikleri ile yeşil esterler (green esters) kapsamındadır.

Yeşil Plastifiyanlar;

Yeşil plastifiyanlar iki sınıfa ayrılabilir:

- 1- Ftalat içermeyen plastifiyanlar: Trimellititler, adipatlar, benzoatlar, epoksiler
- 2- Biyo plastifiyanlar: Hint (castor) yağı, ESBO (Epoxy Soybean Oil), Süksinik asit, Sitratlar ve diğerleri (sitrat esterleri, fosfat esterleri, sebakatlar ve butiratlar)

Plastifiyanlar, küresel PVC pazarının yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Ftalat olmayan plastifiyanlar ise genel plastifiyan pazarının ~%20'sini oluşturur. Bu plastifiyanların yaklaşık %90'ı PVC uygulamalarında kullanılmaktadır.

Ftalat olmayan plastifiyan pazarında yer alan paylar sırasıyla aşağıda yer almaktadır.

- ❖ %26 Adipatlar
- ❖ %25 Trimellititler
- ❖ %20 Epoksiler
- ❖ %19 Diğer ftalatlar
- ❖ %10 Benzoatlar

Ftalat olmayan plastifiyanların en yaygın uygulamaları sırasıyla aşağıda yer almaktadır.

- ❖ %5.4 Filmler ve ambalajlar
- ❖ %5.1 yer ve duvar kaplamaları
- ❖ %4.7 tüketim malları
- ❖ % 4.3 Diğer ürünler
- ❖ %4.0 Kablo ve teller
- ❖ %3.7 kaplanmış elyaflar

Ftalat olmayan plastifiyanlar, tüketim malları, gıda ile temas eden malzemeler ve tıbbi uygulamalar gibi çeşitli hassas uygulamalarda ftalat plastifiyanların yerini almaktadır. Bununla birlikte, ftalat olmayan plastifiyanların yüksek fiyatı, alıcıların daha düşük fiyatlı diğer plastifiyanları tercih etmesine neden olmaktadır. Tüm bu faktörler, ftalat olmayan plastifiyanların orta derecede ikame tehdidini oluşturmaktadır. Bu tehdidi minimize etmek için gelişmekte olan ekonomilerdeki üreticilerin çoğu, düşük işçilik ve üretim maliyetleriyle kendilerine fayda sağlayan prosesler geliştirmeli ve tesisler kurmaktadır.

Bu amaçla;

- Biyo esaslı plastifiyanların üretim proseslerinin geliştirilmesi
- Yaygın kullanılan ftalat türevlerinin yerini alabilmesi için makromoleküler tasarımlarının ve modellemelerinin yapılması
- Dünyada yaygın kullanımı olan ve coğrafyaya özgü olan hint yağı, soya fasulyesi yağı, palmye yağı ve nişasta gibi Türkiye'ye özgü mısır yağı, ayçiçek yağı, zeytin yağı, nişasta vb. hammaddelerin belirlenmesi
- Maliyet düşürücü proseslerin üretim modellerinin geliştirilmesi

- Uygulama alanının artması için petrokimyasal polimerlerle uyumluluğunun Ar-Ge niteliğinde çalışılması
- Yaygın kullanılan kablo, ambalaj, kauçuk sektörü gibi alanlar için ticari ürün hedefinde çalışmalar yapılması

Diğer taraftan plastik mamul malzemelerde şu an kullanılmakta olan Poli-bromlu difenil etherler (PBDE) gibi halojenli yanmayı geciktirici katkılara alternatif olarak; trietilsitrat, fitik asit türevli esterler gibi bazı esterlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu nedenle AB Yeşil Mutabakatına uyumlu bu ürünlerin ülkemizde üretimine yönelik ilk etapta sentez Ar-Ge çalışmalarının yürütülmesine ve bilahare üretimlerine yönelik pilot ölçekte demo çalışmalarına ve nihayetinde de gerçek ölçekte üretimlerine ihtiyaç vardır.

Alev Geciktiriciler;

Alev geciktiriciler, bir yangın durumunda alev üretimini yavaşlatmak oluşumunu yavaşlatarak yangının ilerlemesini geciktirmek için elektronik, tekstil, bina ve mobilyalarda kullanılan polimerlere ve diğer malzemelere eklenen maddelerdir. Alev geciktiriciler, yanan yüzeyde nemi serbest bırakarak veya kömür oluşturarak alevi ve etkisini azaltır. Kömür, yangının yayılmasını engeller ve malzemenin geri kalanını yanmaktan korur. Halihazırda piyasada hem halojenli hem de halojensiz alev geciktiriciler mevcuttur. Bununla birlikte, sağlık riski ve birçok halojenli alev geciktirici üzerindeki kısıtlamalar nedeniyle, üreticiler odaklarını halojensiz alev geciktiricilere yöneltmişlerdir.

Biyo esaslı alev geciktirici olarak kullanılan fitik asit, bitki tohumlarında fosforun ana depolama şeklidir. Tahıl ve yağlı tohumların kuru ağırlığının %6' sını oluşturabilir. Yapısı, güçlü bir şelatlama potansiyeli sağlayan altı fosfat grubu içerir. Alev geciktirici olarak kullanımı, yenilenebilirliği ve yüksek fosfor içeriği (ağırlıkça %28) nedeniyle de araştırma konusu olmuştur. İlk olarak kitosan ile kombinasyon halinde, pamuklu kumaş üzerinde tabakalı bir şekilde bir araya getirilen kaplamanın bir parçası olarak kullanılmıştır. Sonuçlar, yüksek miktarda fitik asit içeren kaplama ile korunan kumaşların kendi kendine sönebildiğini ve yüksek kitosan içeriğine sahip malzeme ile kaplanan kumaşlardan daha iyi yangına karşı performans sergilediğini göstermektedir. Kitosan ve fitik asit içeren bu tür bir polielektrolit kompleksi aynı zamanda yüksek derecede genişlemiş ve kararlı kömürleşmiş yapıların oluşumu sayesinde gelişmiş yangın davranışı gösteren bir etilen-vinil asetat kopolimerine dahil edilmiş ve polimerle de çalışmaları incelenmiştir.

Bu bileşiğin yüksek verimde elde edilmesi için bitkiden ekstraksiyonu ile yüksek saflıkta elde edilmesi gerekmektedir. Bir diğer dezavantajı da; direkt polimer matrisi içerisinde katılmasında veya bağ yaparak yapı içerisinde yer almasında zorluklar yaşanmasıdır. Bu zorlukların giderilmesi için Ar-Ge çalışmalarına ihtiyaç vardır

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

Plastifiyanlar:

- 2018 için küresel ftalat olmayan plastifiyan pazar büyüklüğü: 1,5-1,7 milyar ABD doları bulunmaktadır.
- Türe göre pazar payı: Adipatlar: ~% 25 -30, trimellititler: ~% 20 -25, benzoatlar: ~% 5-10, epoksiler: % 10 – 15
- Uygulamaya göre pazar payı: Döşeme ve duvar kaplamaları: ~% 25-30, teller ve kablolar: ~%20-25, film ve levhalar: ~%15-20, kaplamalı kumaş: ~% 5-10, tüketim malı: ~%10-15
- Kilit piyasa oyuncularının piyasa sıralaması: BASF (Almanya), Eastman Chemical Company (ABD), ExxonMobil (ABD), Evonik Industries (Almanya) ve DIC Corporation (Japonya)
- Dünyada ticari ürünler bahsedilen firmalar tarafından temin edilmektedir ve THS seviyesi 9 olarak belirlenirken Türkiye’de ftalat olmayan veya biyo esaslı plastifiyan üretimi bulunan firma olmadığından THS seviyesi 1-4 arasındadır.

Alev Geciktiriciler:

- Alüminyum hidroksit, 2019 yılında hacim olarak toplam pazarın % 60’ını oluşturmuştur.
- Alüminyum hidroksitin büyük pazar payı, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyetinin sonucudur.
- Organofosforun 2020 ve 2025 yılları arasında hacim açısından yaklaşık % 8’ lik en yüksek CAGR (Bileşik Yıllık Büyüme Hızı- Compound Annual Growth Rate)’ yi kaydetmesi öngörülmektedir.
- Organofosfor, yüksek performanslı ve en pahalı halojensiz alev geciktirici türüdür.
- Diğer halojensiz alev geciktiriciler 2019 yılında hacim bazında %10 pay almıştır.
- 2019 yılında halojensiz alev geciktiriciler pazarı 4.239 milyon ABD doları değerindeydi. Bu pazarın 2020 ve 2025 yılları arasında % 8,6’lık bir CAGR kaydetmesi bekleniyor. Halojensiz alev geciktiricilere olan talep, konut ve ticari binalar için katı çevre düzenlemeleri ve yangın güvenliği standartları tarafından yönlendirilecektir.
- Halojensiz alev geciktiricilerin iki ana tipi alüminyum hidroksit [alüminyum trihidroksit (ATH) olarak da bilinir] ve organofosfor kimyasallarıdır. Alüminyum trihidroksit, muadillerine göre daha düşük fiyatı nedeniyle en yaygın kullanılan alev geciktirici türüdür. Hacim açısından, alüminyum hidroksit halojensiz alev geciktiriciler pazarına hakimken, organofosfor segmenti değer açısından pazara hakimdir.

Polimerlerin doğal özelliklerini değiştirmeyen düşük yükleme seviyesi nedeniyle organofosfor talebi ve kullanımı ivme kazanmaktadır.

- Küresel Alev Geciktiriciler Pazarı 2019 yılında 3.300 Kilotondur.
- BASF SE, Clariant, Lanxess, Israel Chemicals Ltd., and Nabaltec gibi üretici firmaların verileri esas alındığında Küresel Halojensiz Alev Geciktiriciler Pazarınının 2025 yılında 6.230 Milyon ABD Dolar (CAGR -Compound Annual Growth Rate % 8,6) olacağı tahmin edilmektedir.
- Dünyada mevcut çevreci ürünler halojensiz alev geciktiriciler kullanılarak oluşturulmaktadır.

Bu üretimlerle ilgili dünyadaki ve Türkiye'deki genel Teknolojik Hazırlık Seviyeleri (THS) aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

Plastifiyanlar:

Dünya ve Türkiye örnekleri:

Dünyanın çeşitli ülkelerinde (gelişmiş AB ülkeleri, ABD, Japonya Çin ve Hindistan vd.) THS 9' da bu tip yeşil esterlerin ticaretini yapan BASF, Cutina TS, Basci, Xfrjester vb. gibi firmalar mevcut olup sayıları gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizde ise THS 7-9' da orta KOBİ ölçeğinde bu esterlerin sadece bazılarını küçük ve orta kapasitede üreten CHS Endüstriyel Ürünler, 3-S Mühendislik, Green Chemicals gibi firmalar mevcuttur ve bunlar ülkemiz için başarılı örnek olarak sunulabilir.

Pazarda vizyoner liderler; BASF, Eastman Chemical Company, ExxonMobil, Evonik Industries ve DIC Corporation, ftalat içermeyen plastifiyanlar pazarına liderlik ediyor ve vizyoner liderler olarak kabul ediliyor. Sürekli büyümeyi sağlamak için güçlü ürün portföyüne ve sağlam iş stratejilerine sahiptirler.

Yenilikçiler; KLJ Group (Hindistan), Polynt (İtalya) ve Perstorp (İsveç), ftalat içermeyen plastifiyanlar pazarında yenilikçi olarak kabul edilmektedir. Yenilikçi ürünlere ve işlerinin büyümesi için vizyoner liderlerle eşit düzeyde güçlü stratejiler oluşturma potansiyeline sahiptirler. Örneğin, Eylül 2019' da Perstorp, Pevalen Pro olarak yenilenebilir bir poliöl ester (ftalat olmayan) plastifiyanı piyasaya sürmüştür. Bu ürün iyi plastikleştirme verimliliği, daha hızlı işleme, düşük uçuculuk, yüksek UV kararlılığı ve uzun ömür performansı gibi çeşitli özelliklere sahiptir. Daha yüksek düzeyde yenilenebilir içerik sunar ve kaplamalı kumaşlar, suni deri, döşeme, duvar kaplamaları, otomotiv iç mekanları ve spor ve eğlence ürünleri gibi uygulamalar için kullanılır.

Dinamik Ayırıcılar; Lanxess AG (Almanya), Mitsubishi Chemical Corporation (Japonya) ve LG Chem (Güney Kore), ftalat olmayan plastifiyanlar pazarında dinamik farklılaştırıcılar olarak tanımlanmaktadır. Bu firmalar, güçlü iş stratejilerine sahipler ve büyümeleri için çeşitli yeni stratejiler benimsiyorlar. Diğer önemli pazar oyuncularıyla rekabet edebilmek için ürün portföyünü genişletme potansiyeline sahiptirler.

Gelişen Firmalar; UPC Technology Corporation (Tayvan), Hallstar (ABD), KAO Corporation (Japonya), Nan Ya Plastics (Tayvan), OXEA Corporation (Almanya), Velsicol Chemical LLC (ABD), Valtris Specialty Chemicals (ABD), Shandong Qilu Plasticizers (Çin) ve Emerald Performance Materials (ABD), ftalat olmayan plastifiyanlar pazarında yükselen şirketler olarak kabul edilmektedir. Vizyoner liderler ve yenilikçilerle pazarda rekabet edebilmek için güçlü bir ürün portföyü ve iş stratejisi oluşturma potansiyeline sahiptirler. Örneğin, birçok şirket, yeni ftalat olmayan plastifiyan uygulamalarına öncülük etmek için teknoloji alanında geliyor. Ancak diğer taraftan biyo esaslı plastifiyanlar için dünya pazarında henüz üretici bulunmamaktadır.

Alev Geciktiriciler:

Dünya ve Türkiye örnekleri:

Pazarda vizyoner liderler; halojensiz alev geciktirici üreticilerinden en önemlileri BASF SE, Clariant, Lanxess, Israel Chemicals Ltd., and Nabaltec firmalarıdır. Bu firmaların ürettiği hammaddeleri dünya pazarında sektörlerine göre kullananlar;

- ❖ Otomotiv üreticileri; Honda, Ford ve Volkswagen
- ❖ İnşaat sektörü; L&T, Bechtel ve Skanska
- ❖ Elektronik sektörü
- ❖ Kablo ve tel sektörü

Halojensiz alev geciktiricilerin pazarda kullanıldıkları alana göre değerlendirilmeleri ;

- ✓ Poliolefinler, 2019 yılında toplam pazarın hacim olarak % 25'lik bir payını oluşturdu.
- ✓ Poliolefinlerin büyük pazar payı, elektronik ve elektrik endüstrisindeki yüksek taleplerine bağlıyor.
- ✓ Epoksi reçinelerdeki geciktiricilere olan talep, elektrik ve elektronik endüstrisinin büyümesi tarafından yönlendirilecektir. Bu uygulama segmentinin, tahmin süresi boyunca hacim açısından % 7,25' lik bir CAGR (Bileşen Yıllık Büyüme Hızı- Compound Annual Growth Rate) kaydedeceği tahmin edilmektedir.
- ✓ Çeşitli endüstrilerde mühendislik polimerlerinin yaygın kullanımının halojensiz alev geciktiricilere büyük talep yaratması bekleniyor.

Huber Engineered Materials, Italmatch Chemicals S.p.A., DuPont de Nemours Inc., RTP Company ve Kisuma Chemicals BV, halojensiz alev geciktiriciler pazarında yükselen liderler olarak belirlendi. Bu şirketler güçlü ürün portföyüne ve coğrafi avantajlara sahiptir.

İlerleyen Şirketler; Arkema S.A., AkzoNobel N.V. ve Celanese Corporation, halojensiz alev geciktiriciler pazarındaki ilerici şirketler olarak tanımlanmaktadır. Bu şirketler, son derece iyi performans gösteren ve aynı zamanda sağlam iş stratejileri benimseyen çok çeşitli ürünler sunmaktadır.

Sorumlu firmalar; Amfine Chemical Corporation, Greenchemicals SpA, Stahl Holdings B.V., Century Multech, Inc. ve AxiPolymer Inc., piyasada duyarlı şirketler olarak kabul edilir. Bu start-up'lar, rakiplerine kıyasla son derece yenilikçi ürün ve teknoloji geliştirerek yeni ürünler üzerine çalışmaktadırlar.

Yeni başlayan firmalar; Polyplastics Co. Ltd., Thor, Budenheim Chemicals KG, Presafer (Qingyuan) Phosphor Chemical Co., Ltd., Qingdao Fundchem Co., Ltd., Dongying Jingdong Chemical Co., Ltd. ve Gulec Chemicals GmbH, halojensiz alev geciktiriciler pazarında yeni ürünlerle yer almak istemektedirler. Bu firmaların amacı niş ürünlere ihtiyacı olan son kullanıcılara ürün tedarik etmektir.

Ülkemizde ise; halojensiz alev geciktiriciler pazarında üretim yapan firma henüz yoktur. Ancak bazı ester üretici firmaların halojensiz alev geciktiriciler üretimine yönelik Ar-Ge sentez çalışmalarını başlattıkları bilinmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için;

Kimyager (hesapsal kimya, organik sentez, inorganik sentez, homojen ve heterojen kataliz konularında uzman)

Kimya mühendisi (reaksiyon mühendisi, reaksiyon kinetiği, fizibilite konularında uzman)

Malzeme mühendislerinin (morfolojik yapı analizi konusunda uzman) ve Polimer ve Plastik Mühendislerinin bir arada bulunması ve Plastik, ilaç, kozmetik, petro-kimya, boya, ester üretimi vb sektörlerinden uzmanların bir arada çalışması gerekmektedir.

Otomotiv plastik üreticileri, elektrikli araç plastik üreticileri, mühendislik plastikleri üreticileri, otomotiv plastik katkı üreticileri, inşaat ve yapı kimyasalları üreticileri, nakliye, uzay ve havacılık endüstrisi.

Ar-Ge ve Yenilik sürecinde üniversitelerin kimya, kimya mühendisliği, malzeme mühendisliği, polimer ve plastik mühendisliği disiplinleri ve ilgili özel sektörlerin Ar-Ge merkezleri bir araya gelmelidir. Bu çalışmalar Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kuruluşlar tarafından koordine edilmeli ve proje olarak desteklenmelidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

Bu konuda ilgili kamu ve özel sektör küçük / orta / büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinde oluşturulacak bir platformda bir araya gelerek işbirliği yapmalıdırlar.

Kamu destekleri, üniversite, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör Ar-Ge Merkezlerine sanayi işbirliği kapsamında oluşturulacak platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılmalı ve kamu ve özel sektörce desteklenecek projeler şeklinde olmalıdır.

Öncelikle ayrı-ayrı projeler, sonrasında iyi en etkin sonuçların alındığı projeler üzerinden eşgüdüm içinde platform projeleri vb. ayrı-ayrı başvurular alınıp, değerlendirme sürecinden sonra eşgüdüm içinde platform projelerinin de oluşturulmasında yarar vardır.

Özel değerlendirme:

Plastifiyanlar

Büyük ölçekli sanayi kuruluşların, KOBİ'lerin, üniversitelerin, kamu kurumlarının, kamu araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketlerinin biraraya gelmesiyle bir konsorsiyum oluşturulması gerekmektedir. Bu konsorsiyumun çalışması sonucunda kimyasal, fiziksel ve son ürün özellikleri bakımından mevcut kullanılan plastiyanların yerine muadil olabilecek ftalat içermeyen / biyoseaslı en önemli olan plastifiyan(lar) belirlenerek kamu desteği ile Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarının gerçekleştirilip yerli ürün elde edilmesi ve son kullanıcılar tarafından kullanılması hedeflenmelidir.

Alev Geciktiriciler:

Büyük ölçekli sanayi kuruluşların, KOBİ'lerin, üniversitelerin, kamu kurumlarının, kamu araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketlerinin biraraya gelmesiyle bir konsorsiyum oluşturulması gerekmektedir. Bu konsorsiyumun çalışması sonucunda sektör büyüklüğüne göre hedef son kullanıcı için alev geciktirici kimyasalların üretim yöntemi üzerine odaklanılmalıdır. Ürün ihracat için de uygun koşullarda ve standart da üretilmelidir.

Devlet desteği ile Ar-Ge çalışması ve Ür-Ge çalışmaları desteklenerek devlet mevzuatlarına uygun üretim yapacak alt yapı imkanları oluşturulmalıdır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

Ar-Ge süresi: Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularının gerçekleştirilmesi için orta vade (3-5 yıl) yeterli olacaktır.

Bu kritik ürünlerin geliştirilmesi ve üretilmesi için orta vade hedeflenmelidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı toplam 25 Milyon TL ve Demonstrasyon- Pilot üretim için 30 Milyon TL ve tek Yatırım için 60 – 70 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Plastifiyanlar:

Devlet mevzuatlarına uygun regülasyonların ve kısıtların getirilmesi (örneğin ftalat içerikli plastifiyanların kullanım sınırlandırılması/yasaklanması) önerilmektedir.

Ar-Ge amaçlı proje destek mekanizmalarının özel sektör, kamu Ar-Ge kurumları, üniversiteler, KOBİ işbirlikleri çerçevesinde gerçekleştirilmesi için destek mekanizmaları oluşturularak yerli ve ekonomik yeşil plastifiyan katkıların üretilmesi hedeflenmelidir.

Alev Geciktiriciler:

Devlet mevzuatlarına uygun regülasyonların ve kısıtların getirilmesi (örneğin halojenli alev geciktirici kullanımının sınırlandırılması/yasaklanması) önerilmektedir

Ar-Ge amaçlı proje destek mekanizmalarının özel sektör, kamu arge kurumları, üniversiteler, KOBİ işbirlikleri çerçevesinde gerçekleştirilmesi için destek mekanizmaları oluşturularak yerli ve ekonomik yeşil alev geciktirici katkıların üretilmesi hedeflenmelidir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Halihazırdaki mevzuat genel olarak teknolojik ilerlemeye imkan tanımaktadır. Ancak destek mekanizmalarının hızlı ve etkin çalışabilmesi ve sonuçta başarılı olması bürokrasinin daha hızlı çalışmasına ve Ar-Ge, demo/ pilot tesis şeklindeki uygulama ve yatırım desteklerinde kamunun öngörülen takvimlere uymasına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle için ilgili mevzuatta bunu sağlayıcı tedbirlere yer verilmesinde büyük yarar vardır.

Plastifiyanlar:

Uluslararası platformlardaki gerekli regülasyonlar Tablo 5.1.'de yer almaktadır.

Tablo 5.1.Uluslararası Platformlardaki Gerekli Regülasyonlar

Regülasyon	Plastifiyan pazarındaki fonksiyon ve rolü
Centers for Disease Control and Prevention (CDC)	Zararlı maddelere maruz kalmayı önleyerek insanların sağlık ve güvenliğini korur
Environmental Protection Agency (EPA)	EPA, toksisite ve bunlara yaygın insan ve çevresel maruziyet kanıtı nedeniyle ftalatlarla ilgilenmektedir. Çevre ve sağlık tehlikelerine karşı koruma
Consumer Product Safety Commission (CPSC)	Ftalatların toksisitesi ve tüketim mallarındaki varlığı için EPA ile koordinelidir
Food and Drug Administration (FDA)	Gıda, ilaç, tıbbi cihaz ve kozmetik ürünlerinin güvenliğini denetlemek için gıda ile temas eden malzemeleri düzenlemek için EPA ile koordinasyon sağlar
Toxic Substances Control Act (TSCA)	Tüketim malları, oyuncaklar ve gıda ile temas eden malzemeler gibi insanlarla

	temas eden ürünlerdeki ftalatlar dahil toksik kimyasalları düzenler
The Consumer Product Safety Commission	Oyuncaklar gibi çocuklar tarafından kullanılan ürünlerdeki tehlikeli içerikleri sınırlar
Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)	Ftalatların (DEHP, DBP, BBP ve DIBP) REACH Ek XVII'nin 51. Girişi kapsamında plastikleştirilmiş malzemeleri eşyalara dahil edecek şekilde kısıtlaması
European Chemical Agency (ECHA)	Çocuklar tarafından kullanılan ve ağızla temas edebilecek oyuncaklarda veya ürünlerde kullanılacak DINP'nin sadece %0,1'lik konsantrasyonunu sınırlar

Alev Geciktiriciler:

Dünyadaki mevcut regülasyonlar:

- ✓ Şubat 2020'de Avrupa Birliği, elektronik ekranlarda ve plastik muhafazalarda halojenli alev geciktiricilere yasak getirdi.
- ✓ Avrupa'da REACH ve RoHS'ye göre, elektronik ekranların bromlu alev geciktiriciler veya halojenli alev geciktiriciler içermesine artık izin verilmeyecektir.
- ✓ WEEE (Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman) ve SVHC (Çok Yüksek Önem Arz Eden Maddeler) gibi düzenleyiciler, bazı STK'ların girdileriyle, belirli standartlar (Underwriters Laboratories (UL gibi) belirleyerek halojensiz alev geciktiricilere olan talebi artırmaya yardımcı oldular.
- ✓ ABD'de birçok eyalet, çevre üzerindeki toksik etkilerinden dolayı halojenli alev geciktiricilerin katkı olarak kullanımını yasaklamıştır.

Teknik Altyapılar

Bazı üniversitelerimizde, kamuda örneğin TÜBİTAK- MAM' da ve özel sektöre ait yetkin Ar-Ge Merkezlerine sahip özel sektörde üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı genel olarak mevcuttur. Ancak özellikle sanayi Ar-Ge Merkezlerinde çalışan yüksek lisans ve doktora dereceli elemanların sayısı gereken düzeyde değildir. Bu nedenle özel sektöre Ar-Ge

Merkezlerinde sayıca bir oran dahilinde bu nitelikte elemanların görevlendirilmesine yönelik zorlayıcı koşulların getirilmesinde yarar vardır. Örneğin talep edilen desteğin sağlanması için; sunulan projenin kapsam ve bütçesine bağlı olarak gereken minimum yüksek lisans ve doktora dereceli eleman sayısı oranının zorunlu olması gibi.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım teşvik ve desteklerinin çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından sağlanmasında yarar vardır.

Kritik Ürün/Teknoloji 5.3.

5.3. Yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Kritik Ürün/Teknoloji 5.3.

5.3. Yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Dünya çapında çözücü pazarı yaklaşık 30 milyon metrik ton/yıl olup neredeyse tüm imalat ve işleme endüstrileri çözücü kullanımına bağlıdır. Bu büyük tüketim, sonunda bazı ürünlerin ekosisteme sızacağı ve en kritik olarak büyük miktarlarda çevrenin ve suyun kirlenmesine yol açacağı anlamına gelmektedir. Birçok petrol bazlı çözücüler, yüksek toksisite dezavantajlarına sahiptirler ve buharları ozon tabakasının incelmeye neden olurlar. Alkil Laktat gibi yeşil çözücüler ise yenilenebilir kaynaklardan üretilebilirler ve toksik değildir ve aynı zamanda ozon tabakasını da zarar vermezler. Bu çözücülerin çevresel faydalarına ek olarak bertarafının daha ucuz, kolay ve ekonomik olmasından dolayı sağlanan ekonomik tasarruflar, onları iyi bir alternatif haline getirmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Halen kimya sanayinde taşıyıcı ortam, tepkime ortamı, temizleyici ajan olarak kullanılan alifatik (pentan, hekzan vb.) veya aromatik yapıdaki (ksilen, toluen vb.) çözücülerin büyük çoğunluğu petrol kökenli olup insan ve çevre sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle AB Yeşil Mutabakatı doğrultusunda sanayide kullanılan çözücülerin “doğal hammadde kökenli doğada parçalanabilir” yeşil çözücüler olması istenmektedir ve bunların ülkemizde üretimi gerekli olmaktadır.

Bu bağlamda asetik, laktik, sitrik, malik, fumarik ve suksinik asit vb. gibi organik asitlerden alkollerle (metil alkol, etil alkol, izopropil alkol, butil alkol ve 2- etilhekzil alkol vb.) esterleşme reaksiyonu ile metil asetat, etil asetat, butil asetat 2- etilhekzil asetat, metil laktat, etil laktat, propil laktat, izopropil laktat, butil laktat,, 2- etilhekzil laktat, trietil sitrat gibi yeşil çözücülerin üretim proses ve teknolojisinin geliştirilmesi ve ticari ölçekte üretilmesi ülkemiz kimya sanayi ve diğer sanayi kolları (boya, mürekkep, yapıştırıcı vd.) için büyük önem arz etmektedir.

Diğer taraftan bu yeşil çözücülerin bazı kozmetik ürünlerinde girdi olarak kullanımına ve yine üretimi olan fermente organik asitlerin özellikle laktik asitin sodyum-, potasyum-,

çinko- ve alüminyum laktat gibi tuzlarının da gıda, ilaç ve takviye besin maddeleri (supplementaries) sektörlerinde katkı olarak kullanımları dikkati çekmektedir.

Laktatlar, laktik asidin etanol, propanol ve bütanol gibi çeşitli alkollerle işlenmesinden elde edilen toksik olmayan ve yeşil çözücülerin bir sınıfıdır. Bu çözücülerini yapmak için laktik asit besleme stoğu, biyokimyasal veya termokimyasal yollarla elde edilebilir. Termokimyasal yol ekonomik olmakla birlikte bu aşamada toksik hidrojen siyanür kullanılır ve rasemik bir laktik asit karışımı oluşur, çevre uyumlu biyoteknolojik üretim ise mikrobiyal fermantasyon teknolojilerini kullanır ve termokimyasal yola göre daha seçicidir.

Düşük buhar basıncı ve görece yüksek kaynama noktaları laktat türü çözücülerini; halojenli çözücüler, aseton ve tolüen için iyi bir ikame ve reçineleri ve polimerleri çözmek için mükemmel bir çözücü yapar.

- Yerli sanayinin ihtiyacı olan yeşil çözücülerin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi
- Çevreye zararlı çözücülerden çevre dostu çözücülere geçiş yapılması
- Biyolojik kökenli organik asitlerin transformasyonu ile biyoçözücülerin üretimi önem kazanmaktadır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Bu üretimlerle ilgili dünyadaki ve Türkiye’deki Teknolojik Hazırlık Seviyeleri (THS) aşağıdaki Tabloda özetlenmiştir.

(Not-1: Üniversitelerin, Ar&Ge merkezlerinin ve üretim firmalarının sahip oldukları THS’ leri birbirinden farklı olduğundan dünyada ve Türkiye’de; tek bir THS işaretlemek yerine mevcut THS aralığının işaretlenmesi tercih edilmiştir.)

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	✓
THS 4	<input type="checkbox"/>	✓

THS 5	✓	✓
THS 6	✓	☐
THS 7	✓	☐
THS 8	✓	☐
THS 9	✓	☐

Türkiye’de ve dünyada organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimi konusunda teknolojik hazırlık seviyelerini ürün bazında gösteren Tablo ise aşağıda verilmektedir.

	THS Türkiye	THS Dünya
Etil Asetat	9	9
Butil Asetat	9	9
Metil Laktat	1-4	9
Etil Laktat	1-4	9
PropilLaktat	1-4	9
İsoPropillaktat	1-4	9
Butillaktat	1-4	9
2-Etilhekzil asetat	1-4	9
2- Etilhekzillaktat	1-4	9
Sodyum laktat	1-4	9
Potasyum laktat	1-4	9
Çinko laktat	1-4	9
Alüminyum laktat	1-4	9

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Bugün dünyada özellikle THS:7-9 düzeylerinde yeşil çözücü (green solvent) üreten firmalar bulunmaktadır. Örneğin Galactic ve Liberty gibi şirketler

- Metil asetat - Etil asetat
- Metil laktat - Etil laktat
- Propil laktat - İso propil laktat
- Butil asetat - Butil laktat
- 2-Etilhekzil asetat - 2- Etilhekzil laktat
- Trietil sitrat

gibi yeşil çözücüleri üretmekte ve dünyaya pazarlamaktadırlar.

Yeşil çözücü ve tuzlarını (green solvent) üreten Galactic (ABD- Belçika) ve Liberty (İtalyan) şirketleri örnek olarak verilebilir.

Türkiye’de ise yakın THS düzeylerinde Adokim ve Kiraz Grup şirketlerinin yeşil çözücü olarak etil asetat ve butil asetat üretimlerini yaptıklarını görmekteyiz.

Diğer taraftan fermente organik asitlerin özellikle laktik asitin sodyum-, potasyum-, çinko- ve alüminyum laktat gibi tuzlarının dünyada üretimleri (örneğin Galactic Co.) varken ülkemizde ticari ölçekte üretimleri yoktur.

Türkiye’de Adokim Kimya Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi Antalya’da ADO Grup şirketleri bünyesinde 2018 yılında kurulmuştur. 2020 yılı mart ayında üretim tesisleri faaliyete girmiştir. Türkiye’de ilk etil ve butil asetat üreten yerli firmadır. Yıllık 60.000 ton Etil asetat ve butil asetat üretim kapasitesine sahiptir.

Etil asetat ve Butil asetat üreten Adokim (Antalya) ve Etil asetat üreten Kiraz Grup (Mersin) şirketleri başarılı örnek ve girişimler olarak verilebilir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Kimyager (organik sentez, inorganik sentez konularında uzman) ve kimya mühendislerinin (reaksiyon mühendisi, reaksiyon kinetiği, fizibilite konularında uzman) bir arada çalışması ve fermentasyon, biyoteknoloji, organik asit, ester üretimi yapan sektör temsilcilerinin birlikte çalışma yürütmesi önemlidir.

Bu tip kimyasalların sıfırdan üretimi için disiplinler arası bir birliktelik gerekmektedir. Temel bilimler ile mühendislik bilimlerinin birlikteliği vardır. Sentezi geliştirecek ve laboratuvar

ölçeğindeki denemeleri yapacak kimyagerlerden, prosesi büyük ölçeğe uyarlayacak kimya mühendislerinden ve üretimi gerçekleştirecek ve sürdürülebilirliğini sağlayacak makine ve endüstri mühendislerinden oluşacak bir takımın ortaklaşa çalışması sonucunda hedefe ulaşılabilir. Eğer üretim süreçleri fermantasyon basamakları içeriyorsa aynı zamanda biyokimyacılar/biyoteknologlardan da destek alınması gerekecektir.

Üretilen ürünler gıda, boya, deterjan, ilaç, kozmetik, yapıştırıcı gibi birçok sektörde hammadde ya da yardımcı madde olarak kullanıldığı için bu kuruluşların bu tip malzemeler için yıllık ihtiyaçlarını belirlemeleri gerekmektedir. Aynı zamanda farklı sektörlerde farklı saflık derecelerinde ve fiziksel özelliklerde malzeme kullanımı olduğundan kullanılan bu malzemelerin teknik özellikleri de belirtilmelidir. Bu bilgiler ışığında üretilen kimyasal için gerekli yıllık ihtiyaç miktarları belirlenmeli ve teknik özelliklere göre proses tasarımı yapılmalıdır.

Özellikle bu tip yatırımların ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olacağından devlet tarafından gerekli teşviklerin sağlanması gerekmektedir.

Ar-Ge ve Yenilik sürecinde üniversitelerin kimya, kimya mühendisliği, biyoloji- biyoteknoloji disiplinleri ve ilgili özel sektörlerin Ar-Ge merkezleri oluşturulacak bir eşgüdüm platformunda bir araya getirilmelidir. Bu çalışmalar Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kuruluşlar tarafından koordine edilmeli ve proje olarak desteklenmelidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Küçük / orta / büyük ölçekli Ar-Ge ve Yenilik Projelerinde oluşturulacak bir platformda bir araya gelerek işbirliği yapmalıdırlar.

Kamu destekleri, üniversite ve sanayi işbirliği kapsamında oluşturulacak platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılmalı ve kamu ve özel sektörde desteklenecek projeler şeklinde olmalıdır.

Öncelikle ayrı-ayrı projeler, sonrasında iyi en etkin sonuçların alındığı projeler üzerinden eşgüdüm içinde platform projeleri vb. ayrı-ayrı başvurular alınıp, değerlendirme sürecinden sonra eşgüdüm içinde platform projeleri desteklenmelidir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

5.3.a. Organik asitlerden yeşil çözücülerin ve fermente asit tuzlarının üretimleri

Ar-Ge süresi: Belirlenen Ar-Ge ve yenilik konularının gerçekleştirilmesi için orta vade (3-5 yıl) yeterli olacaktır.

Bu kritik ürünlerin geliştirilmesi için orta vade hedeflenmelidir.

Ayrılması gereken tahmini bütçe “birden fazla üniversite ve özel sektör desteği için” Ar-Ge basamağı toplam 25 Milyon TL ve Demonstrasyon- Pilot üretim için 30 Milyon TL ve tek küçük-orta üretim kapasiteli yatırım için 100- 150 Milyon TL olarak öngörülmektedir.

Etil laktat üretimi için gerekli olan basamaklar aşağıdaki gibidir.

- Hammadde öğütme
- Etanol ve laktik asit fermantasyonu
- Etanol damıtma
- Elektrodializ yoluyla laktik asit saflaştırması
- Etil laktat esterleştirme
- Pervaporasyon ve damıtma yoluyla etil laktat saflaştırması

Yıllık 15 milyon litre gibi yüksek etil laktat üretim kapasitesine sahip tesisin sadece ekipman maliyetinin en az 30-50 milyon dolar olduğu tahmin edilmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamunun bu konuda önemli görevleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ekonomik katkılardır. Ekonomik katkılar iki şekilde olabilmektedir. Bunlardan birincisi verilecek Ar-Ge ve Ür-Ge proje destekleri ile sanayi, özel sektör, akademisyen ve kamu kurumlarının bir araya gelerek üretim için gerekli araştırmaları yapmaları sağlanmalıdır. Bu projeler biyoçözümlerin üretimin yerli imkanlar ile gerçekleştirilmesi için bilgi birikiminin oluşmasına imkan verecektir.

Kamuya düşen ikinci husus ise sektör temsilcilerinin ve üretime talip grupları bir araya getirerek ihtiyaç ve ürünlerin doğru olarak tespit edilmesinde düzenleyici kurum olarak görev almasıdır.

Kamuya düşen en önemli görev ise bu malzemeleri üretecek üreticilere gerekli teşviklerin verilerek yurt içinde fizibilitesi düşük çıkacak üretimlerin üretim sürdürülebilirliklerinin sağlanmasıdır.

Belirlenen konuların yapılabilmesi için kamu; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör Ar-Ge merkezlerine proje, pilot tesis kurulumu ve yatırım kademesinde ise özel sektöre çeşitli destek mekanizmaları ile yardımcı olmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Halihazırdaki mevzuat genel olarak teknolojik ilerlemeye imkan tanımaktadır. Ancak destek mekanizmalarının hızlı ve etkin çalışabilmesi ve sonuçta başarılı olması bürokrasinin daha hızlı çalışmasına ve Ar-Ge, demo/pilot tesis şeklindeki uygulama ve yatırım desteklerinde kamunun öngörülen takvimlere uymasına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle için ilgili mevzuatta bunu sağlayıcı tedbirlere yer verilmesinde büyük yarar vardır.

Teknik Altyapılar

Üretilen ürünlerde en önemli özellik istenen saflık ve ilgili safsızlıklar olacaktır. Bu konuda test ve analiz merkezleri yeterli seviyededir. Aynı zamanda çözücülerin yapısına ve teknik isteklerine bağlı olarak asidite, yoğunluk, distilasyon aralığı gibi birçok kimyasal ve fiziksel özelliğinde analiz edilmesi gerekecektir. Bu analizleri TSE, ASTM, ISO gibi ulusal ve uluslararası standartları uygulayarak gerçekleştirecek birçok kurum bulunmaktadır.

Bazı üniversitelerimizde, kamuda örneğin TÜBİTAK- MAM' da ve özel sektöre ait yetkin Ar-Ge Merkezlerine sahip özel sektörde üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

İnsan kaynağı üniversitelerimizde ve sanayide rahatça bulunacak seviyededir. Ancak, bu insan kaynağını ve bilgi birikimini belirli noktaya kanalize edecek teşvikler ve proje kaynakları verilmelidir.

Diğer taraftan özellikle sanayi Ar-Ge Merkezlerinde çalışan yüksek lisans ve doktora dereceli elemanların sayısı gereken düzeyde değildir. Bu nedenle özel sektöre Ar-Ge Merkezlerinde sayıca bir oran dahilinde bu nitelikte elemanların görevlendirilmesine yönelik zorlayıcı koşulların getirilmesinde yarar vardır (Örneğin talep edilen desteğin sağlanması için; sunulan projenin kapsam ve bütçesine bağlı olarak gereken minimum yüksek lisans ve doktora dereceli eleman sayısı oranının zorunlu olması gibi).

Destek ve Teşvikler

Bu tür yatırımlarda ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksek olmaktadır. Bu nedenle üretimi gerçekleştirecek firmalara yeterli devlet yatırım teşvikleri (Makine – teçhizat ithalatında gümrük vergisi istisnası, düşük gelir vergisi, düşük SGK primi, KDV muafiyeti vb. hatta makine -teçhizat için belirli % de hibe vb.gibi) verilmelidir. Aynı zamanda bu yerli imkanlar ile üretilen bu tip çözücü ve maddeleri kullanan şirketlere de insan ve çevre sağlığına duyarlı oldukları için bazı dolaylı teşvikler verilebilir. Buna ek olarak yurt içinde çevre dostu olmayan çözücülerini kullanan firmalara bazı caydırıcı yaptırımlar uygulanabilir.

Yeşil çözümlerin üretiminde hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin yukarıda açıklandığı gibi çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Diğer

Yukarıdaki başlıklarda kapsanmayan diğer kritik hususlar

Kritik Ürün/Teknoloji 5.4.

5.4. Biyobazlı poliöl üretim süreçlerinin geliştirilmesi (poliüretan ve poliester üretimlerinde kullanılmak üzere)

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Kritik Ürün/Teknoloji 5.4.

5.4. Biyobazlı poliöl üretim süreçlerinin geliştirilmesi (poliüretan ve poliester üretimlerinde kullanılmak üzere)

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Polioller için küresel pazar 2019'da 26,2 milyar ABD doları olduğu belirtilmiştir. Bu pazarın 2024 yılına kadar 34,4 milyar ABD dolarına çıkması beklenmektedir. Dünyada 2019 yılında yaklaşık 22 Mt'a ulaşan küresel üretim görülmüştür. Poliüretan endüstrisinin sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla, on yıldan fazla bir süredir pazar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobazlı poliollerin kullanılması üzerine yoğunlaşmakta ve biyobazlı poliollere olan talep hızla artmaktadır.

Bitkisel yağlar, mikroalgler, odun talaşı veya sap, saman gibi lignoselüloz ve polisakkaritler dahil olmak üzere biyobazlı poliollerin hazırlanması için farklı yenilenebilir kaynaklar araştırılmaktadır. Bu biyokütleler farklı tipte poliollerin hazırlanabileceği çok çeşitli kimyasal yapılar açısından zengindir. Bu kapsamda, poliester poliollerin hazırlanmasında polisakkaritler daha çok kullanılmış ve aromatik poliollerin hazırlanmasında lignoselüloz araştırılmıştır. Bunlar arasında bitkisel yağlardan biyobazlı poliollerin üretimi, akademi ve endüstride en popüler olanlardır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.4.a. Poliüretan, poliester ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Üretimde biyobazlı monomer (diasit, diol) sentezi ve özellikle yağlardan poliöl üretimi öne çıkmaktadır.

Bugüne kadar, bir diasit ve bir diol arasındaki polikondenzasyon reaksiyonu, ticari polyesterlerin sentezi için en çok çalışılan ve en sık keşfedilen yolu temsil etmektedir. Biyobazlı polyester poliollere geçmek için hem akademi hem de endüstride yenilenebilir kaynaklardan çeşitli monomerik dioller ve diasitler araştırılmıştır. Etilen glkol, 1,3-propandiol, 1,4-bütandiol, 1,3-bütandiol ve 1,4-sikloheksandimetanol gibi lineer diollerin farklı polyester poliollerdeki biyobazlı içeriği arttırdığı araştırılmıştır. Bu dioller süksinik, adipik veya sitrik asit gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen diasitlerle polimerize edildiğinde tamamen biyobazlı polioller elde edilebilir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

- Dünyada THS 7- 8- 9
- Türkiye’de THS 2- 3- 4

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Petrokimya bazlı hammaddelere alternatif olarak birçok sayıda şirket, 1,4-bütandiol (BioBDO) için Genomatica ve adipik asit, Dupont Tate ve Lyle BioProducts veya Metex Noovista dahil olmak üzere biyobazlı diollerin veya diasitlerin üretimi için endüstriyel süreçler geliştirdi. 1,3-propandiol için (Susterra ve TILAMARTM) ve nişasta fermantasyonundan türetilen süksinik asit için Roquette (BIOSUCCINIUM). Bu biyobazlı dioller ve diasitlerden sentezlenen poliüretanlar (PU), başlangıçta Merquinsa tarafından geliştirilen ve şu anda Lubrizol tarafından ticarileştirilen Pearlthane ECO PU'ları ve Covestro tarafından üretilen biyobazlı 1,3-propandiol (BIOSUCCINIUM)'dan üretilen Desmopan EC PU ailesini içerir.

Biyobazlı polioller (yağlardan elde edilen polioller, doğal polioller gibi), çoğunlukla Cargill, Croda, Oléon-Novance (Avril grubu), Stahl veya Covestro gibi büyük kimya şirketleri tarafından ve ayrıca Polylabs, ExaPhen veya Polykey gibi küçük şirketler tarafından üretilip ticarileştirilmiştir. 2021 yılında Dünya genelinde doğal polioller üreticileri: Alberdingk Boley (Albodur); BASF (Sovermol); Cargill (BiOH); Croda (Priplast); Eagle Chemicals (T series); Emery oleochemicals (Emerox); Hokoku (Castor Oil Polyol); Itoh oil chemicals (Uric); NivaPol (Polem); Oléon (Radia); Polylabs (BioPolyol); Stahl (Relca Bio); Vertellus (Polycin).

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Üniversiteler, Araştırma Kurum ve Kuruluşları, Ar-Ge Merkezleri, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı; TÜBİTAK; T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, kimya alanında faaliyet gösteren firmalar birarada çalışmalıdır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Orta-Büyük Ölçekli firmalar

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

Hamle, 1507, 1505 gibi çağrılarda Üniversite-Sanayi İşbirliklerinin teşvik edilmesi yeni üretim teknolojilerinin kazanımı

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

5.4.a. Poliüretan, polieter ve poliester üretimlerinde terebentin, bitkisel yağ, selülöz, lignin, şeker ve nişasta gibi biyobazlı hammaddelerin kullanılması

Petrokimya bazlı hammaddelere alternatif diol ve diasit üretimi (Orta-Uzun vade)

Biyobazlı polioliol üretimi (Kısa vade)

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Belirlenen konularda üretim yapılabilmesi için kamu; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör Ar-Ge merkezlerine proje, pilot tesis kurulumu ve yatırım kademesinde ise özel sektöre çeşitli destek mekanizmaları ile yardımcı olmalıdır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Halihazırdaki mevzuat genel olarak teknolojik ilerlemeye imkan tanımaktadır. Ancak destek mekanizmalarının hızlı ve etkin çalışabilmesi ve sonuçta başarılı olması bürokrasinin daha hızlı çalışmasına ve Ar-Ge, demo/pilot tesis şeklindeki uygulama ve yatırım desteklerinde kamunun öngörülen takvimlere uymasına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle için ilgili mevzuatta bunu sağlayıcı tedbirlere yer verilmesinde büyük yarar vardır

Teknik Altyapılar

Bazı üniversitelerimizde, kamuda örneğin TÜBİTAK- MAM' da ve özel sektöre ait yetkin Ar-Ge Merkezlerine sahip özel sektörde üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı genel olarak mevcuttur. Ancak özellikle sanayi Ar-Ge Merkezlerinde çalışan yüksek lisans ve doktora dereceli elemanların sayısı gereken düzeyde değildir. Bu nedenle özel sektöre Ar-Ge Merkezlerinde sayıca bir oran dahilinde bu nitelikte elemanların görevlendirilmesine yönelik zorlayıcı koşulların getirilmesinde yarar vardır. Örneğin talep edilen desteğin sağlanması için; sunulan projenin kapsam ve bütçesine bağlı olarak gereken minimum yüksek lisans ve doktora dereceli eleman sayısı oranının zorunlu olması gibi.

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve özel sektör sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Bu tür yatırımlarda ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle üretimi gerçekleştirecek firmalara yeterli devlet yatırım teşvikleri (Makine – teçhizat ithalatında gümrük vergisi istisnası, düşük gelir vergisi, düşük SGK primi, KDV muafiyeti vb. hatta makine -teçhizat için belirli % de hibe vb. gibi) verilmelidir. Aynı zamanda yerli imkanlar ile üretilecek bu maddeleri kullanan şirketlere de doğa dostu yaklaşımları için dolaylı bazı teşvikler verilebilir.

Biyobazlı polioliol üretim süreçlerinin geliştirilmesinde ve elde edilen poliolden, poliüretan ve poliester üretimlerinde hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin yukarıda açıklandığı gibi çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Kritik Ürün/Teknoloji 5.5.

5.5. Karbon kaynağı olarak karbondioksitin yeşil kimyasalların üretiminde kullanılması

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.5.a. Poliüretan / poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilir yeşil kimyasalların (örn. halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Kritik Ürün/Teknoloji 5.5.

5.5. Karbon kaynağı olarak karbondioksitin yeşil kimyasalların üretiminde kullanılması

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Karbondioksit; ucuz, yenilenebilir, bol, toksik olmayan ve kimyasal reaksiyonların karbon kaynağı bir hammadde olduğundan biyobozunur polimerlerin temelini oluşturmaktadır. Sera etkisine neden olan başlıca çevre kirleticilerinden biri olarak kabul edilen bu atık gazın hammadde olarak kullanılması; doğrudan emisyonunun azaltılmasına dolayısıyla ekonomik ve ekolojik açıdan fayda sağlamaktadır.

Çevre koruması ve sürdürülebilirlik için, karbondioksit bazlı biyobozunur polimerler; petrol kullanımına yönelik talebi azaltmak ve atık plastiklerden kaynaklanan kirlilik sorunlarını çözmek için alternatif olarak geliştirilmektedir.

Sentetik polimerler; otomotiv endüstrisi, inşaat, paketleme, tıbbi cihazlar, kişisel bakım ürünleri, elektronik ve benzerlerini kapsayan yaygın uygulamalarıyla modern toplumun temel malzemeleridir. Dünya polimer endüstrisi yıllık 380 milyon tonluk bir hacme sahip olup; özellikle petrol kökenli sentetik polimerlerin hammadde kaynağından üretim sürecine ve kullanımdan sonraki atık durumuna kadar geçen süreçlerdeki çevresel etkileri endişe vericidir.

Sentetik polimerler esas olarak fosil kaynaklardan elde edilir ve söz konusu polimerlerin üretimi için her yıl daha da artan bir taleple karbon kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, geri dönüşümü yapılmayan atık plastiklerin hacmi muazzam bir şekilde artmaktadır. Çoğu plastik mükemmel dayanıklılık gösterdiğinden, kullanım sonrası birikimleri yüzlerce yıl sürebilmekte ve bu da karada ve okyanusta geri dönüşü olmayan çevresel hasarlara neden olabilmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.5.a. Poliüretan/poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılacak yeşil kimyasalların (örn. halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

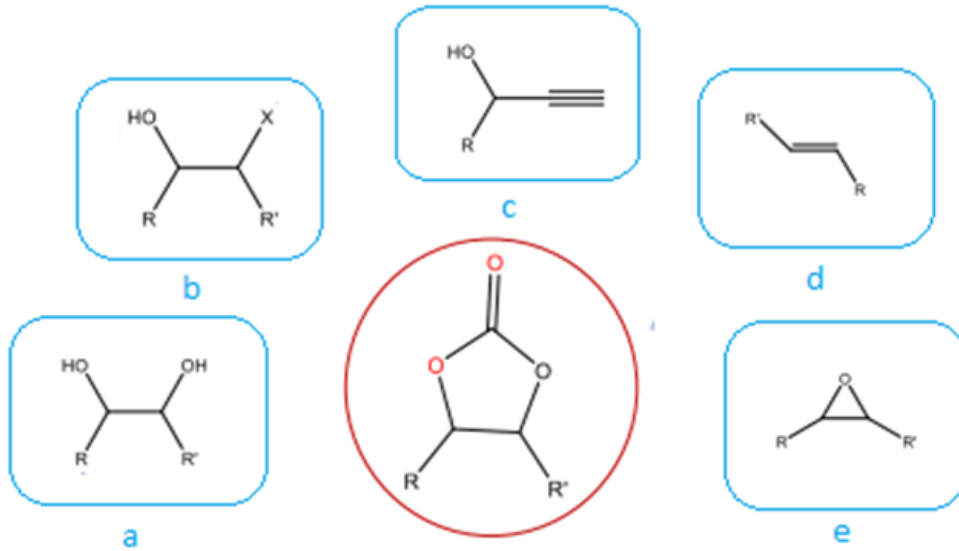
Tipik Poliüretan (PU) sentezi, diisosiyanatlar ile diollerin (polioller) bazik bir katalizör varlığında katılma reaksiyonları ile gerçekleşir. İzosiyanatlar, fosgen ve aminlerin reaksiyonu sonucu

oluşurlar. Petrokimya türevi olan monomerler ile üretilen PU'lar köpük, kaplama, elastomer, yapıştırıcı, fiber ve medikal gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Poliüretanların küresel pazar için artan önemi göz önüne alındığında, sürdürülebilirlik açısından toksik izosiyanatların yanı sıra aşırı toksik fosgen uygulamasından kaçınan alternatif sentez yolları zorunludur.

Karbondiyoksit temelli halkalı karbonatlar; birçok endüstriyel uygulamada temiz içerikli çözücüler ve özellikle izosiyanat içermeyen poliüretanların (NIPU) sentezinde yer almaktadırlar.

Halkalı karbonatların karbondiyoksit kullanılarak üretimi için 5 farklı başlangıç maddesi kullanılabilir.



a) Dioller, b) Halohidrinler, c) Propargil alkoller, d) Alkenler ve e) Epoksitler

Literatürde diğer sentez yöntemlerinde yüksek sıcaklık ve gaz basıncı gerektiğinden, en tercih edilen yol; epoksitlerden eldesi (e) olarak yer almaktadır. Ancak epoksitlerden eldesi de katalizör varlığında gerçekleşmektedir. Yeni yapılan çalışmalarda oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında sentezlerin gerçekleştiği yer olsa da, ılımlı koşullar altında oldukça aktif katalitik sistemlerin arayışı hala devam etmektedir.

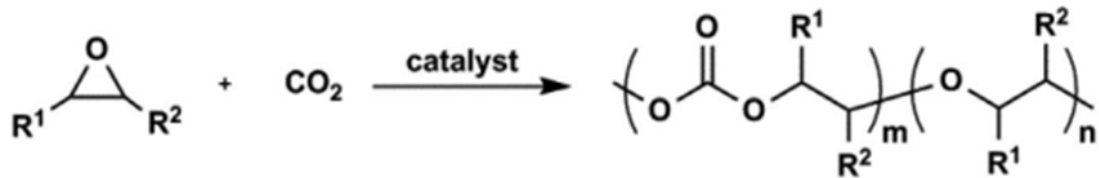
Endüstriyel düzeyde siklik karbonatlar hazırlamak için en yaygın ve etkili yol, CO₂'nin epoksitlere eklenmesidir. Karbon dioksit gibi yenilenebilir, toksik olmayan ve yaygın olarak bulunan bir reaktant kullandığından, bu reaksiyonun yeşil ve sürdürülebilir kimya bağlamında bir çok değeri vardır; ayrıca reaksiyon %100 verim ile gerçekleşmesi ve çözücü gerektirmemesi önemli bir avantajdır.

Halkasal karbonat üretimi CO₂ konsantrasyonunu azaltmada önemli bir etkiye sahiptir ve mevcut yıllık üretiminin 100 kton/yıl civarında olduğu tahmin edilmektedir. Ancak dünyadaki CO₂ emisyonunu dikkate alındığında; üretimde kullanılan CO₂ oranının hala düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Buna rağmen özellikle CO₂ tutulmasındaki yeni gelişmeler (CO₂ yakalama, depolama teknolojilerinin geliştirilmesi vb.) sebebi ile halkalı karbonat üretiminin artacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla özellikle poliüretan/poliüre eldesinde kullanılacak halkalı karbonat üretimi hem sera etkisinin azaltılması hem de sürdürülebilir çevre dostu üretim açısından önemlidir.

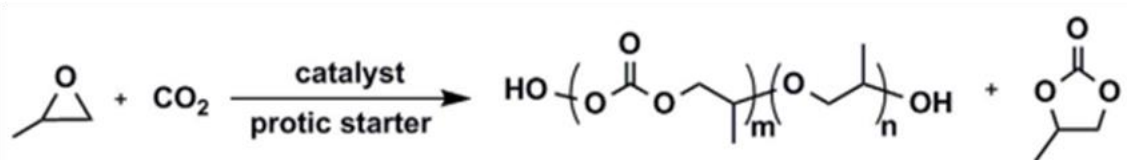
Ticari olarak poliüretanlar, diizosiyanatlar, polioller (polyester veya polieter) ve düşük moleküler ağırlıklı zincir uzatıcıların reaksiyonuyla üretilir. Diizosiyanatların toksisitesi, neme duyarlılığı ve fosgen bazlı sentezi olması sebebi ile izosiyanat esaslı olmayan poliüretanların (NIPU'lar) elde edilmesi üzerine çalışmaların endüstride yoğunlaştığı görülmektedir.

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Karbondioksit bazlı polikarbonatlar; CO₂'in katalizör yardımıyla epoksit ile kopolimerizasyonu ile elde edilmektedir. Karbondioksit temelli polieter polioller, sonraki kademedeki poliüretanların üretiminde kullanılmaktadır. Söz konusu polioller, katalizör ve zincir transfer ajanı varlığında karbondioksit ile epoksitlerin telomerizasyonu sonucu elde edilmektedir.



a) Polikarbonatların sentezi



b) Poliollerin sentezi

Polipropilenkarbonat (PPC), son 50 yılda sistematik akademik çalışmaların yanı sıra çoğu endüstriyel faaliyetlerde yer alan karbondioksit bazlı polimerdir. Tarım, ambalaj, kaplama ve

pil (elektrolit) gibi alanların yanında özellikle biyomedikal alanda biyobozunur PPC kullanımına ihtiyaç her geçen gün önemli bir şekilde artmaktadır.

Karbondiyoksit temelli polioller eterler, poliüretanların başlangıç maddesi olarak kullanıldığından eldeleri ve amaca uygun poliüretan sentezi için yapıların modifiye edilmesi önem arz etmektedir.

Karbondiyoksit molekülü simetrik, lineer ve nonpolar bir yapıya sahip olduğundan kimyasal olarak oldukça kararlı ve aktive edilmesi zordur. Kopolimerizasyon için, doğası gereği aktif olmayan CO₂' i aktive etmek için katalizörler kullanılmaktadır. Katalizör seçiminin yanı sıra elde edilen polimerlerin performansının artırılması için yapı iyileştirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

Karbondiyoksit bazlı PPC'nin termal stabilitesi ve mekanik özellikleri, endüstriyel olarak üretilen petrol kökenli polikarbonattan daha düşüktür. Reaksiyon koşullarının optimize edilmesiyle verim, moleküler ağırlık, yan ürün kontrolü ve PPC özelliklerinin iyileştirilebileceği umulmaktadır. Zayıf termal ve mekanik özelliklere sahip biyobozunur PPC'nin termal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için diğer bir yol ise; zincire daha bulk veya rijit yapıların eklenmesidir. Örneğin, halka açma kopolimerizasyonu yoluyla PPC'nin omurgasına siklik epoksitler, siklik esterler, anhidritler ve akrilatlar gibi üçüncü bir monomerin dahil edilmesi, terpolimerlerin T_g veya T_m'sini ayarlamak için uygulanabilir bir yöntemdir. Arzu edilen özellikleri elde edebilmek için uygulanabilecek diğer bir yöntem ise; polimerin başka bir yapıyla kuvvetlendirme seçeneğidir. Biyobozunur doğal (nişasta) ve sentetik (polibütilen süksinat, polilaktik asit) polimerler veya sentetik polimerlerin (PVA, EVOH) PPC ile blend edilmesi ile oldukça başarılı kompozitler elde edilmektedir.

Poliollerin yapısının poliüretanların performansı üzerinde önemli etkileri vardır. Özellikle molekül ağırlığı ve molekül ağırlığı dağılımı, T_g ve viskozite gibi fiziksel parametreleri değiştirmektedir. Diğer bir parametre ise eter/karbonat oranıdır. Üçüncü dikkat edilmesi gereken husus ise; poliollerin lineer veya dallanmış yapısının ayarlanabilmesidir.

Yapı iyileştirmesi için;

- Sentez yöntemlerinin geliştirilmesi; metal bazlı katalizör uygulamaları
- Sentez yöntemlerinin geliştirilmesi; Organik temelli katalizör uygulamaları
- Terpolimerizasyon uygulamaları ile zincir zenginleştirme
- Farklı polimerler ile Blend uygulamaları

- Uygun protik ajan seçimi ve reaksiyon koşulları üzerinde kontrol altında katalizörün aktivitesini değiştirerek zincir uzunluğunun geniş bir aralıkta ayarlanması gibi alternatifler mümkündür.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

5.5.a. Poliüretan / poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilir yeşil kimyasalların (örn halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

Bu konuda; TNO Research Organization, University of York, RWTH Aachen University, University of Twente gibi akademik kuruluşların ve Sintef, FeyeCon D&I, Carbon Recycling International ve Evonik Creavis GmbH gibi özel kuruluşların paydaş olduğu 7. Çerçeve Programı kapsamında bir proje tamamlanmıştır.

Dünyada ve Türkiye’de konu ile ilgili THS’leri aşağıda gösterilmiştir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Bu konu ile ilgili olarak; HORIZON 2020 projeleri çerçevesinde devam eden ve sonuçlanmış projeler bulunmaktadır. THS’leri ise aşağıda verilmiştir:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

5.5.a.Poliüretan/poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilir yeşil kimyasalların (örn halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

Dünyadaki başarılı örnekleri incelendiğinde; ürünleşme ve ticarileşme aşamasında olan firmalar aşağıda verilmiştir:

THS 6-9: Prototip Geliştirme, Ürünleşme ve Ticarileşme

- Simreka (Almanya)
- Huntsman Corporation (USA)
- Polyclean Technologies Inc.
- CD Bioparticles
- SK Chemicals
- Novomer Inc
- Covestro Germany

Halkasal karbonatlar (örn. propilen karbonat), çok sayıda uygulamaya sahip önemli malzemelerdir. Lityum iyon pillerde, kaplamalarda, kimyasal ara ürünlerde, polar çözücülerde ve kozmetik/kişisel bakım ürünleri ve deterjanlarda katkı maddeleri olarak kullanılırlar.

Poliüretan ve Poliüre üretiminde kullanılmak üzere iki fonksiyonlu halkasal karbonatların ise ticari olarak henüz bulunmadığı görülmektedir.

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Karbondioksit temelli polikarbonat ve poliollerin dolayısıyla poliüretanların üretiminde aynı başlangıç maddesinden yararlanılmaktadır. Başarılı bir üretim prosesi ortaya koymuş firmalar ve yıllık üretim kapasiteleri aşağıdaki Tablo 5.2.'de yer almaktadır¹.

Tablo 5.2. Poliüretanlar Üretiminde Kullanılan CO₂ Bazlı Polikarbonatların ve Poliollerin Sentezi İçin Gelişmiş Düzeydeki Uygulamalı Tesisler

Firma	Menşei	Yıllık üretim kapasitesi (ton/yıl)	Ürün	CO ₂ payı(%)	CO ₂ temelli karbon içeriği (%)
Asahi Kasei ve lisanslı diğer üreticiler	Çeşitli	750000	Aromatik Polikarbonatlar	17,3	4,7
Covestro	Almanya	5000	PU üretimi için polikarbonat polioller	20	5,5
Empower Materials	Amerika	500	PPC, PEC, PCHC, PPCHC, PBC	~ 40	~ 11
Jiangsu Zhongke Jinlong-CAS Chemical	Çin	10000	PPC polioller	40	11
Jilin Boda New Materials	Çin	50000	PPC veya PEC	~ 40	~ 11
Inner Mongolia Mengxi High-Tech Group	Çin	3000	PPC, PEPC, PPCHC	~ 40	~ 11
Saudi Aramco (Eskiden Novomer)	Amerika	5000	PPC, PEC	43	~ 12
Taizhou BangFeng Plastic	Çin	30000	PPC	~ 40	~ 11
Nanyang Zhongju Tianguan-Tianguan Group	Çin	5000	PPC	~ 40	~ 11

PU: Poliüretan, PPC: Polipropilen karbonat, PEC: Polietilen karbonat, PCHC: Polisikloheksen karbonat, PPCHC: Polipropilen sikloheksen karbonat, PBC: Polibutilen karbonat.

[1] Nova Institute GmbH, 2021. "Carbon Dioxide (CO₂) as Chemical Feedstock for Polymers – already nearly 1 million tonnes production capacity installed", <https://nova-institute.eu/press/?id=236>.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.5.a. Poliüretan / poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilir yeşil kimyasalların (örn. halkasal karbonat /cyclic carbonate) üretimi

İlgili proje çalışmalarında; özellikle polimer alanında uzmanlaşmış kimya mühendisleri, malzeme mühendisleri, biyomedikal mühendisleri ve kimyagerler bir araya getirilmelidir. Üniversitelerin yanısıra Araştırma Kurum ve Kuruluşları, Ar-Ge Merkezleri, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı; TÜBİTAK; Kimya alanında faaliyet gösteren ve yetkin Ar-Ge Merkezine sahip firmalar birlikte çalışmalıdırlar.

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

İlgili proje çalışmalarında; özellikle polimer alanında uzmanlaşmış kimya mühendisleri, malzeme mühendisleri, biyomedikal mühendisleri ve kimyagerler bir araya getirilmelidir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.5.a. Poliüretan/poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilir yeşil kimyasalların (örn. halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

Üretilen halkasal karbonat tespit edildikten sonra; Ar-Ge çalışmaları için yetkin akademisyen ve araştırmacılardan çalışma grupları oluşturulmalıdır. Küçük ölçek üretim için belirlenen çıkış kimyasallarından farklı yöntemlerle elde edilen ürünlerden hangilerinin ticarileşebileceği pozitif bir şekilde ortaya konulmalı, daha sonra bu ürün ile büyük ölçek çalışmalarına başlanılmalıdır. Bu aşamada büyük ölçek çalışmalarının ardından, ticarileşecek ürünün üretimini yapabilecek teknik altyapıya sahip özel sektör kuruluşları belirlenmelidir. Özel sektör temsilcilerinin üretim için; yetkinlik ve tecrübelerinin de kullanılabilir olduğu bir proje ayağı oluşturulmalıdır.

Hamle, 1507, 1505 gibi çağrılarda Üniversite-Sanayi İşbirliklerinin teşvik edilmesi yeni teknolojilerin kazanımına yol açacaktır.

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Üretime yönelik Ar-Ge çalışmaları için yetkin akademisyen ve araştırmacılardan çalışma grupları oluşturulmalıdır. Küçük ölçek üretim için belirlenen kimyasallardan, ticarileşebileceği

pozitif bir şekilde ortaya konanlar ile büyük ölçek çalışmalarına başlanılmalıdır. Bu aşamada büyük ölçek çalışmalarının ardından, ticarileşecek ürünün üretimini yapabilecek teknik altyapıya sahip özel sektör kuruluşları belirlenmelidir. Özel sektör temsilcilerinin üretim için; yetkinlik ve tecrübelerinin de kullanılabileceği bir proje ayağı oluşturulmalıdır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

5.5.a. Poliüretan / poliüre üretiminde isosiyanatlar yerine kullanılabilecek yeşil kimyasalların (örn halkasal karbonat / cyclic carbonate) üretimi

Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla

5.5.b. Polikarbonat ve polieter poliollerin üretiminde karbon kaynağı olarak karbondioksit kullanımı

Proje iki fazda devam edebilir:

İlk fazın kısa vadede tamamlanması beklenmektedir. THS 2 -5-arasındaki Ar-Ge niteliğindeki çalışmaları kapsamaktadır. Bu aşamada bütçe gerektiren başlıklar; sentez kimyasallarının ve katalizörlerin temini, karakterizasyon cihazlarının sarfları ve ılıman olmayan reaksiyon koşulları için spesifik reaktörlerin alımı olarak değerlendirilebilir. Her bir karbondioksit temelli kimyasal için 2 - 5 MTL bütçe ayrılmasının uygun olacağı öngörülmektedir.

- Küçük ölçek polimerlerin sentezi için uygun yöntemlerin belirlenmesi
- Uygun katalizörlerin seçimi ve optimizasyon çalışmaları
- Elde edilen ürün ve ara ürünlerin saflaştırılması
- Termal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Projenin ikinci fazında ise; orta vadede tamamlanması talep edilebilir. THS 6- 8 arasında pilot ölçekte üretimin yapılması ve ürünlerin ticarileşmesine yönelik çalışmaları kapsamaktadır. Bu aşamada, özel sektörden yetkinliğini aktarabilecek ve üretimi üstlenebilecek teknik alt yapıya sahip firmalar proje ortağı olmalıdır. Pilot ölçek çalışmalarında yer alan her bir prototip için 5-10 milyon TL bütçe ayrılmasının uygun olacağı öngörülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Karbondiyoksit temelli halkalı karbonatlar, polikarbonat ve polioller biyobozunur malzemeler olduğundan üretimi için mevzuatta herhangi bir değişikliğe gerek yoktur. Aksine bu malzemelerin kullanımının artırılmasına yönelik çalışmaların yer alması gerekmektedir. Örneğin Avrupa Kimya Sanayi Konseyinin (CEFIC) orta vadeli planlarında (2020-2025) karbondiyoksit temelli polimerlerin ticarileşmesi yer almaktadır.

Teknik Altyapılar

TÜBİTAK MAM teknik altyapısı küçük ve/veya büyük ölçekte üretilebilecek polimerlerin eldesinde yeterlidir. Özellikle küçük ölçekte Ar-Ge niteliğinde araştırmalar için, polimerlerin ve katalizörlerin sentezi, saflaştırma ve yapısal karakterizasyon çalışmaları yapılabilir. Ayrıca sentezlenen polimerlerin termal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli altyapı bulunmaktadır. Ayrıca gelişmiş üniversitelerimizin özellikle polimer konusunda yetkin araştırmacılar bu proje çalışmalarına dahil edilmeli, onların ileri laboratuvar imkanlarından yararlanılmalıdır.

İnsan Kaynakları

Sentez, saflaştırma ve yapısal karakterizasyon için özellikle polimer ve organik kimya alanlarında çalışmalar yapmış kimyagerlerin; pilot ve orta - büyük ölçek üretim için kimya mühendislerinin; uygulamalara yönelik teknik özelliklerinin belirlenmesi için malzeme ve biyomedikal mühendislerine ihtiyaç duyulacaktır. Üniversitelerde ve TÜBİTAK- MAM'da çalışan akademisyen, araştırmacı, yüksek lisans ve doktora öğrencileri ile olası projede Ar-Ge personeli olarak yer alabilirler. Ticarileştirmeye yönelik tecrübelerinden faydalanmak üzere konuya ilgi duyan ve yetkin özel sektör temsilcilerinin de projede yer almasında yarar vardır.

Destek ve Teşvikler

İlgili konuda hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Kritik Ürün/Teknoloji 5.6.

**5.6. Karbon kaynağı olarak karbondioksit ve yeşil hidrojenin kullanılması
ile sentetik yakıt üretimi**

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Kritik Ürün/Teknoloji 5.6.

5.6. Karbon kaynağı olarak karbondioksit ve yeşil hidrojenin kullanılması ile sentetik yakıt üretimi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Dimetil eter (DME) standart ortam sıcaklığında ve basıncında toksik olmayan bir gazdır. Genel olarak endüstride aerosol püskürtücüsü olarak, sprey boya uygulamalarında ve saç spreyi, köpük traş kremleri gibi tüketici ürünlerinde kullanılmaktadır. Dünyada en çok DME üretimi ve tüketimi Çin'dedir. DME'nin fiziksel/kimyasal özellikleri LPG'ye ve doğal gaza (NG) benzediğinden içten yanmalı araçlarda yakıt olarak kullanılabilir. Bilhassa, dizel motorlu araçlar için çevre ve insan dostu alternatif temiz yakıt olma özelliği ile DME öne çıkmaktadır çünkü DME dizel araçlarda kullanıldığında kükürt oksitler ve parçacık maddeler (PM) oluşmaz. Dolayısıyla, petro-dizel yakıtına göre çevre ve insan sağlığına etkileri oldukça azdır. Bu bağlamda, Volvo ve Renault şirketleri öncülüğünde alternatif yakıt olarak dizel motorlu araçlarda kullanılabilirliği uygulamalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmalardan, Volvo şirketinin, DME 'in alternatif yakıt olarak araçların yakıt tanklarında depolanabilmesinin ve araçların yakıt dağıtım sistemlerine uygunluğunun incelendiği ABD patent ofisinden alınmış bir patenti bulunmaktadır (US 10465605, Kasım 5 2019). DME endüstride temel olarak metil alkolden ve/veya sentez gazından üretilmektedir. Uluslararası şirketler, araştırma enstitüleri ve üniversiteler tarafından bu konuda ABD patent ofisinden alınmış patentler de bulunmaktadır.

CO₂ üzerinden çeşitli ürünlerin üretilmesi mümkündür. Ancak dünyanın yıllık toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık 35 milyar ton olduğu düşünüldüğünde, CO₂' in tek bir ürüne dönüştürüldüğü teknoloji yerine çeşitli ürünlere de dönüştürüldüğü farklı teknolojiler hazırlamak sera etkisini minimize etmek için uygun olacaktır. Bu noktada DME ürünü gerek CO₂ üzerinden doğrudan üretilmesi gerekse metanol üzerinden üretilmesi sebebiyle ön plana çıkmaktadır. CO₂ üzerinden üretilen DME proseslerinde maksimum dönüşüm %20 mertebelerindedir. Termodinamik olarak bu miktarı arttırmak mümkün olmayacağı için bu

teknolojide temel belirleyici faktör CO₂ üzerinden proses kurmaktan ziyade yeşil hidrojen maliyetleridir.

Sonuç olarak, CO₂' in DME'ye dönüştürüldüğü tesisleri yapılabilir (feasible) bir yatırım haline getirmek için bir yandan daha yüksek aktiviteye sahip daha seçici katalizörler geliştirilirken, bir yandan da düşük maliyette yeşil hidrojen teminini geliştirmek gerekmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dimetil Eter (DME) üretiminde; doğal gaz yerine yanma proseslerinde ana çıktı olan ve bazı kimyasal proseslerde ise yan ürün olarak oluşan CO₂ kullanılabilir. CO₂' in reaktant olarak kullanılması durumunda DME'in üretimi ekonomik olacaktır. Bu şekilde DME üretimi ile atık/yan ürün CO₂'in çevreye salımı da minimize edileceğinden atmosferdeki CO₂ miktarının azaltılmasına katkıda bulunulacaktır. Akademik literatürde katalitik olarak iki aşamalı ve/veya doğrudan - yani tek aşamalı - DME sentezi üzerine çalışmalar yaygın olarak bulunmaktadır. Ancak, son zamanlarda doğrudan DME sentezi üzerine reaktör tasarımı, uygun termodinamik şartların belirlenmesi ve çok fonksiyonlu katalizörlerin geliştirilmesi gibi konularda geniş araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin; Takeishi K. ve Wagatsuma Y., (2016) DME'i sadece karbon dioksit kullanarak (doğrudan sentez yaklaşımı) ve karbon dioksit/karbon monoksit karışımı kullanarak (dolaylı sentez yaklaşımı) sentezlenmesini gerçekleştirmişlerdir. Bu

çalışmanın sonucunda daha yüksek DME seçiciliği iki basamaklı sentez yönteminde Cu-Ga/Al₂O₃ katalizörünün, doğrudan sentez yönteminde ise Cu-Zn/Al₂O₃ katalizörünün daha etkili olduğu rapor edilmiştir. CO₂'den metanol ve metanolden DME sentezi için ise doğrudan sentezin daha etkili olduğu ileri sürülmüştür.

Bu bağlamda Türkiye'de petrokimya firmalarının da bazı başlangıç girişimleri olmakla birlikte dünyada bu teknoloji THS 4 seviyesindedir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Genel olarak metil alkol (metanol) ve sentez gazı üretiminde doğal gaz (NG) kullanılmaktadır. Toyo-Engineering Co. ve Japon MGC Group şirketleri DME üreten fabrika tasarımında öncü durumdadır. Avrupa'da Grillo-Werke AG tarafından Frankfurt'da endüstriyel park bölgesinde yıllık yaklaşık 20.000 ton DME üretilmektedir. Haldor-Topsoe, Amoco, Aveflor, Toyo Engineering Co., Jiutai Energy Co., JGS Holdings Corporation ve Grillo-Werke AG gibi şirketler, doğal gazdan ve/veya metil alkolden alternatif yakıt olarak DME üretmektedirler. Doğal gaza alternatif olarak biyolojik kaynak – biyogaz - kullanılarak DME üretimi, İsveçli Chemrec şirketi tarafından pilot ölçekte yapılmıştır.

Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler olarak Fledged projesi, Thyssenkrupp'un The Carbon2Chem projesi, AB projelerinden ise MefCO₂ ve Fokus projeleri örnek gösterilebilir.

2009 yılında İzlanda'da Mitsubishi Heavy Industries firmasıyla ortak geliştirilen bir projede CO₂ üzerinden DME üretiminin sahada fizibilite çalışması yapılmıştır. Raporun sonucunda üretilen DME'nin mevcut fosil yakıtlara vergi eklenmiş hali ile aynı maliyette olduğu söylenmiştir. 2019 yılında yayımlanan bir habere göre BASF, Linde ve Lutianhua firmalarının CO₂ üzerinden DME üretimi için pilot tesis kurma kararı aldıkları duyuruldu. Ancak henüz bu proje ile ilgili bir gelişme paylaşılmadı.

Türkiyede, SOCAR Ar-Ge Merkezinde tek aşamada CO₂' den DME sentezleyebilen katalizörün geliştirilmesi projesi vardır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Direkt yöntemle CO₂'den DME sentezi için katalizör ve proses geliştirmek amacıyla üniversiteler ve yetkin Ar-Ge Merkezine sahip özel sanayi kuruluşları ortak çalışmalar yürütebilirler.

CO₂ dönüştürme teknolojisi henüz olgunlaşmamış bir proses olduğu için özel sektör ve kamu kurumlarından farklı disiplinlerin bir arada çalışması gerekmektedir. Belirtilen sorunların çözümüne yönelik, fizik, kimya ve malzeme biliminde uzman kişiler bir arada çalışmalı, proses mühendisleri bu çıktıları sahaya entegre etmelidir. Bu araştırmacılar mevcut teknolojiyi etkin takip edebilen ve bunların uygulamasında tecrübe sahibi olmalıdır. Bu sayede en yüksek verimli katalizör ve prosesin geliştirilmesi mümkün olacaktır.

DME ihtiyacı olan sektörler, özellikle petrol rafinerileri ve petrokimya firmaları mutlaka bu geliştirme projesinin içinde olmalıdır. Özellikle yüksek CO₂ emisyonuna sahip olan firmaların kurulacak bir finansal destek havuzunda yer alması ve geliştirilecek teknolojinin kullanım hakkının bu firmalara verilmesi ile bu teknolojinin ülkemizde geliştirilmesinin önü açılabilir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

Üniversite, kamu ve özel sanayi kuruluşları hizmet alarak veya hizmet veren sıfatıyla bir araya gelerek geliştirme çalışmaları yürütebilirler. Bu çalışmalarının finansal desteğinin kamu ve ilgili petrol rafineri - petrokimya şirketleri tarafından sağlanması yerinde olacaktır.

Oluşturulacak bir platformda eş güdüm içindeki bir disiplin sürekli deneyler gerçekleştirirken, diğer bir disiplin bu deneylere ait simülasyonları gerçekleştirebilmeli, yorumlar getirebilmeli ve en iyi koşulları önerebilmek amacıyla sürekli iletişim halinde çalışmalıdır. Bu şekilde deney, test ve analiz alt yapısı olan paydaşlar yalnızca bu işe odaklanıp olabildiğince fazla bilgi toplarken bu bilgilerinde kullanılacağı başka bir paydaş da paralelde bu bilgileri işleyerek, bilgi toplama ve yorumlama arasındaki zaman kaybını engelleyecektir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

5.6.a. Karbondioksit ve yeşil hidrojen ile dimetileter (DME) üretimi

CO₂'den DME sentezi için etkin katalizör ve proses geliştirilmesi ve pilot üretim için orta vade Ar-Ge çalışmaları gerekmektedir. Kritik ürün / teknoloji ise uzun vadede hedeflenmelidir.

Belirtilen teknoloji yeşil hidrojen üretim teknolojisine bağlı olduğu için hidrojen üretim teknolojilerin zaman planlamalarına uygun olarak belirlenmelidir. Ayrılması gereken bütçeler ise mevcutta bulunan pilot sahaların kurulum maliyetleri dikkate alınarak belirlenmelidir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Belirlenen konularda geliştirme yapılabilmesi için oluşturulacak bir platform çerçevesinde eşgüdüm içerisinde; kamu; üniversiteler ve özel sektör Ar-Ge Merkezleri etkin katalizör ve proses geliştirilmesi ve pilot üretim için birlikte çalışmalıdır. Yatırım kademesinde ise özel sektöre kamunun çeşitli destek mekanizmaları ile yardımcı olması gerekli olabilir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Halihazırdaki mevzuat genel olarak teknolojik ilerlemeye imkan tanımaktadır. Ancak destek mekanizmalarının hızlı ve etkin çalışabilmesi ve sonuçta başarılı olması bürokrasinin daha hızlı çalışmasına ve Ar-Ge, demo/pilot tesis şeklindeki uygulama ve yatırım desteklerinde kamunun öngörülen takvimlere uymasına sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle için ilgili mevzuatta bunu sağlayıcı tedbirlere yer verilmesinde büyük yarar vardır

Teknik Altyapılar

Bazı üniversitelerimizin, kamuda örneğin TÜBİTAK- MAM' ın ve petrol rafineri ve petrokimya şirketlerine ait yetkin Ar-Ge Merkezlerinin geliştirme, test ve sertifikasyon çalışmaları için altyapıları yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde ve sanayide yeterli sayıda ve ihtiyaç duyulan yetkinlikte insan kaynağı genel olarak mevcuttur. Ancak özellikle sanayi Ar-Ge Merkezlerinde çalışan yüksek lisans ve doktora dereceli elemanların sayısı gereken düzeyde değildir. Bu nedenle özel sektöre Ar-Ge Merkezlerinde sayıca bir oran dahilinde bu nitelikte elemanların görevlendirilmesine yönelik zorlayıcı koşulların getirilmesinde yarar vardır (Örneğin talep edilen desteğin sağlanması için; sunulan projenin kapsam ve bütçesine bağlı olarak gereken minimum yüksek lisans ve doktora dereceli eleman sayısı oranının zorunlu olması gibi).

Destek ve Teşvikler

Hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere, devletin araştırma kurumlarına ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Bu tür yatırımlarda ilk yatırım maliyetleri oldukça yüksek olmaktadır. Bu nedenle üretimi gerçekleştirecek firmalara yeterli devlet yatırım teşvikleri (Makine – teçhizat ithalatında gümrük vergisi istisnası, düşük gelir vergisi, düşük SGK primi, KDV muafiyeti vb. hatta makine -teçhizat için belirli % de hibe vb. gibi) verilmelidir. Aynı zamanda bu yerli imkanlar ile DME'i üretecek şirketlere de dolaylı olarak karbon emisyonunu minimize ettikleri için karbon teşvikleri verilebilir.

CO₂ ve yeşil hidrojenden DME üretim sürecinde, gerekli etkin katalizör ve prosesin geliştirilmesinde hedeflenen ilerlemenin sağlanması ve sanayinin bu ilerlemeye entegre olabilmesi için; üniversitelere ve sanayi kuruluşlarına proje bazında Ar-Ge, uygulama bazında demo- pilot tesis ve ticarileşme için de özel sektöre yatırım destek ve teşviklerinin yukarıda açıklandığı gibi çeşitli mekanizmalarla kamu tarafından verilmesinde yarar vardır.

Teknolojik Hedef 6:

YEŞİL HİDROJEN ÜRETİM PROSESLERİ

*Sudan (Water splitting) alternatif enerji kaynakları kullanarak yeşil hidrojen
üretimine imkan tanıyacak teknolojilerin geliştirilmesi*

Kritik Ürün/Teknoloji 6.1.

6.1. Elektroliz proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit malzemelerin geliştirilmesi**
- 6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi**
- 6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi (Alkalin elektroliz prosesi, PEM elektroliz prosesi vb)**

Kritik Ürün/Teknoloji 6.1.

6.1. Elektroliz proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Günümüzde üretilen hidrojenin yaklaşık %95'i fosil kaynaklarından üretilmekte ve karbondioksit (CO₂) salımına sebep olmaktadır. Bu sebeple yeşil mutabakat stratejileri kapsamında karbon salımına sebep olmadan yeşil hidrojen üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar vb) kullanılarak suyun elektrolizi karbon salımına yol açmadan yenilenebilir yeşil hidrojen üretimi için kullanılacak yöntemlerin başında gelmektedir.

Elektroliz elektrik enerjisi kullanılarak suyun bileşenleri olan hidrojen ve oksijene parçalanma (water splitting) prosesidir. Bu reaksiyonun gerçekleştirildiği sistemlere elektrolizör denir. Küçük, orta ve büyük ölçeklerde hazırlanabilmekte ve amaca yönelik olarak çoğunlukla polimer elektrolit membran (PEM), alkali ve katı oksit elektrolit temelli elektrozörler yeşil hidrojen üretimi için kullanılmaktadırlar. Elektrolizörlerde bir birim hücre temel olarak birbirinden bir elektrolit/membran yardımıyla ayrılan anot ve katottan oluşmaktadır. Elektrokimyasal olarak hedeflenen iyon özellikleri baz alınarak, iyon transferine yardımcı (hız ve elektron verimliliği gibi parametrelere dayanarak) membran (zar) adı verilen ayraçlar kullanılmaktadır. Bu membran yardımıyla kısmen ayrışabilen hedef iyonlar anot ve katot tarafında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda moleküler gaz formunda oksijen (O₂) ve hidrojene (H₂) dönüşürler. Elektroliz ile hidrojen üretimi proseslerinin önündeki en büyük problemlerden biri kimyasal malzeme ve mekanik sistem kaynaklı düşük verimli üretimdir. Bir diğer önemli problem ise yüksek üretim maliyetidir. Bu amaçla, alternatif enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin kullanıldığı elektrolizör sistemlerinde performans, maliyet ve dayanıklılık konularında halihazırda varolan problemlerin aşılması için gerekli olan iyileştirmelerin yapılmasıyla 2025 yılına kadar 2\$/kg H₂, 2030 yılına kadar 1\$/kg H₂ üretim hedeflerine ulaşılması gerekmektedir [1].

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hidrojen üretimi hedefleri 2030 yılında 2 GW, 2053 yılında ise 70 GW elektrolizör kapasitesine ulaşmak ve 2035 yılında hidrojen üretim maliyetlerinin 1,2 \$/kg altına düşürmektir.

Hem alkali ve hemde PEM elektrolizörlerin ticarileşmiş birçok örneği vardır. Ticari elektrolizörler farklı güç kullanımlarında farklı hidrojen üretim hızlarında ortalama %55 verimle çalışmaktadırlar. Ticari elektrolizörler amaca uygun olarak farklı ölçeklerde birim hücrelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan yığınlar şeklinde üretilmektedir. Bir elektrolizör modülü (yığını) ölçeğine göre birkaç yüz birim hücreden oluşmaktadır. Hücre performanslarının iyileştirilmesinin yanında modülün kontrolünde kullanılacak kütle ve ısı akış kontrol üniteleri, güç elektronikleri ve farklı sensörlerin (basınç, pH, sıcaklık, kaçak sensörleri gibi) geliştirilmesi de büyük önem taşımaktadır.

Elektroliz ile hidrojen üretimi proseslerinin önündeki en büyük problem olan hidrojen üretim maliyetinin konvansiyonel fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemleri ile yarışabilir düzeyde olması gerekmektedir. Bu sebeple suyun elektrolizi ile hidrojen üretim maliyetini azaltmak için elektrolizörlerin tüm bileşenlerinde performans, maliyet ve kararlılık iyileştirmeleri için yeni ürün ve teknoloji geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle yeni ve özgün hücre tasarımı, iyileştirilmiş kütle ve ısı yönetimi ile geliştirilecek yeni elektrolizörlerin geliştirilmesi, bu elektrolizörlerde kullanılacak yeni elektrotlar, elektrotlarda kullanılacak elektrokatalizörler ve yeni elektrolit sistemleri ile ilgili iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gelişmeler özellikle düşük aşırı gerilime sahip ucuz ve kararlı elektrokatalizör geliştirilmesi ve düşük elektronik ve yüksek iyonik iletkenliğe sahip, yüksek mekanik ve termal dayanımlı ve ucuz elektrolitlerin geliştirilmesi çalışmalarını içermektedir. Ayrıca elektrolizör hücresi ve hücre yığınlarının çalışma süreçlerinin iyileştirilmesi ve operasyonel ömrünün iyileştirilmesi yönünde yeni stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Günümüzde hidrojenin yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretiminin maliyeti 5 \$/kg düzeyindedir. Yeşil hidrojenin enerji sisteminde yer alabilmesi ve elektrolizle yeşil hidrojen üretiminin konvansiyonel yöntemlerle yarışabilir hale gelebilmesi için üretim maliyetinin %80 azaltılarak 1 \$/kg seviyelerine düşürülmesi gerekmektedir.

Elektrolizörler için tanımlanan mevcut sorunların çözümü sırasında karşılaşılması muhtemel yeni zorluklar da mevcut problemlere eşlik etmektedir. Kombine sorun ve çözümlere dayalı yeşil hidrojen değer zinciri bu anlamda önemlidir. Ortak disiplinlerin bütünsel yaklaşımı ile maliyetler düşürülüp erişilebilir bir kaynak sağlanacağı gibi bunun sürdürülebilir teknik iyileştirmelerle fark yaratması gerekmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi

Alkali su elektrolizörleri (AWE), proton değiştirici membran elektrolitli su elektrolizörleri (Proton exchange membrane water electrolyzer (PEMWE)) ve katı oksit membranlı su elektrolizörleri (solid oxide membrane water electrolyzer (SOMWE)) başta olmak üzere farklı elektrolizör sistemleri farklı elektrolit sistemleri ve çalışma şartlarından dolayı farklı elektrot sistemleri içermektedir. Hidrojen ve oksijen üretiminin gerçekleştirildiği katot ve anot malzemeleri elektrolizörlerin performansını etkileyen en önemli bileşenlerdir. Elektrolizörlerin anot ve katodunu ayıran ve elektrolizör türüne göre değişiklik gösteren diğer önemli bir bileşende elektrolitlerdir.

Elektrot malzemelerinde elektriksel iletkenlik, mekanik dayanıklılık, çevresel potansiyel zehirlilik gibi faktörler göz önünde bulundurularak, su ayrışmasını en verimli gerçekleştirilebilen malzemelerin en düşük maliyetli sistemlerde sunulabilmesi rekabetçi teknolojilerde kritik öneme sahiptir. Su ayrışması gibi elektriksel iletkenlik esasına dayalı, THS 1-7 arası elektrokimyasal sistemlerde karbondan platine uzanan geniş bir elektrot malzeme ağı vardır.

Elektrokatalizörlerler sisteme ayrı bir bileşen olarak dahil edilebileceği gibi elektrot üzerinde ya da elektrolit içeriğinde de sisteme dahil edilebilir. Reaksiyon verimliliğini arttıran ancak elektroliz sistemlerinde maliyeti de arttırdığı belirtilen katalizör sistemleri, bilimsel çalışmalarda odak haline gelmiştir. Hedeflenen kimyasal reaksiyon için özelleşmiş anodik veya katodik katalizör bileşenleri, henüz ticari ölçekler için rekabetçi olamasa da alternatif elektrokimyasal tekniklerinin, teknolojik çalışmaların geliştirilmesinin önünü açmıştır ve artan bir ivme ile kısa ve orta vadede belirlenen problemlerin türüne göre çözümünün gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir.

Elektrolitler hedeflenen kimyasal reaksiyonda çalışacak elektrokatalizörleri ve kullanılan elektrot malzemelerini de etkiler. Bu sebeple, elektrolit düzeyinde geliştirilen yeni teknolojik/bilimsel çalışmalar, elektrolizörün tüm bileşenlerini etkiler ve verimlilik üzerinde geliştirilebilecek yeniliklere olanak sağlar. Özellikle anolit ve katoliti birbirinden ayıran gaz ve elektron transferine izin vermeyen yüksek iyonik iletkenliğe sahip yeni elektrolitlerin geliştirilmesi ile elektrolizörlerin performansının iyileştirilmesi mümkündür.

Halihazırda alternatif temiz enerji kaynağı olarak yeşil hidrojen üretiminin ana teknolojisi elektroliz metodudur. Teknolojik ve finansal anlamda yeşil hidrojenden faydalanabilmek için elektrolizör teknolojisinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Elektrolizörlerin performanslarının artırılarak hidrojen üretim maliyetinin düşürülmesi için ucuz, kararlı ve yüksek elektrokatalitik aktiviteye sahip elektrot sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, yüksek iyonik iletkenliğe, termal ve mekanik dirence sahip ucuz elektrolitlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Elektrolizörlerde kullanılan elektrot yapıları ve bu elektrotlarda kullanılan elektrokatalizörlerin maliyeti, kararlılığı ve elektrokatalitik aktiviteleri elektrolizörlerin performansını ve dolayısıyla hidrojen üretim maliyetini etkilemektedir. Bunlara ek olarak difüzyon tabakaları, bipolar plakalar, sızdırmazlık contaları gibi komponentlerin yerli üretiminin ihtiyacı karşılayacak nitelikte olmaması da üretim maliyetlerini doğrudan etkilemektedir.

Elektrolizör hücresinde tüm bileşenler için en büyük sorun kimyasal reaksiyonun doğası gereği korozyondur. Elektroliz sırasında, tüm su molekülleri ayrıştırılamaz. Mekanik olarak elektrolizör bileşenleri zaman içerisinde suya karşı mekanik ve kimyasal direnç gösteremez ve dolaylı olarak elektrolizörün verimliliği düşer, maliyet üzerindeki paha etkisi artar. Sulu ortam çalışmalarının negatif etkilerini azaltmak için tercih edilen, kısmen korozyona daha dirençli, yüksek iletkenlik kapasiteli platin, iridyum vb. elektrot malzemeleri ya da bunların alaşım halleri kullanılır. Bu sayede elektrot kararlılığı artırılarak, elektrolizör verimliliğindeki düşüş engellenmeye çalışılır. Ancak, bu malzemelerin de fizyolojik zehir özelliği taşımaları, metal bağılıkları, çevresel dönüşüm sorunları ve sistem maliyetinde sebep oldukları fiyat dezavantajı ile yeşil hidrojen üretiminde elektrot malzeme ve teknolojileri bir verimlilik kısıtı olarak görülmektedir. Bu problem için kimyasal ve mekanik iyileştirilmelere ihtiyaç vardır.

Korozyon, elektrokatalizör için de bir aktivite engelleyici olarak çalışmaya devam eder. Elektroliz sürecinin termokimyasal limitlerinden biri olan indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonları sırasında elektron transferine yönelik yardımcı olarak çalışır. Birçok elektrokatalizör çalışmasında, katalizör aktivitesindeki kısıtın korozyon sebepli elektrot üstü oksijen zehirlenmesi (birikmesi) adı verilen yük birikmesinden kaynaklandığı belirtilir. Bu sebeple, elektrokatalizör malzemelerinde kullanılan miktar ve malzemenin kararlılığı göz önünde bulundurulunca yüksek aktiviteli katalizör malzemeler maliyetli bir bileşen olur. Bu maliyeti düşürmek için katalizör özelinde, hedeflenen indirgenme/yükseltgenme reaksiyonu adreslenerek sistemin ihtiyaç duyduğu aktivite iyileştirme çalışmalarının yapılması gereklidir.

Elektrolitler, reaksiyonun itici güç ortamı olarak tanımlanabilir. Değişen malzemelere, potansiyel (voltaj) farklılıklarına, elektron transferine uygun ortamın sağlanabilmesi, doğrudan elektroliz verimliliğini etkiler. Ek bir bileşen olarak kullanılan membran malzemeler ile bu adaptasyon özelleştirilip anot ve katot odacıklarına ayrıştırılarak elektrolit ortamdaki maksimum fayda sağlanmaya çalışılır. Ancak membran kullanımı ek bir maliyet olmakla beraber, zaman içerisindeki aşınma, tıkanma, yıpranma gibi sorunlar ile elektrolit ortamının verimlilikte dezavantaj yaratmasına sebep olabilir. Dolayısı ile tüm elektrolizör bileşenlerinde bahsedildiği gibi elektrolit/membran teknolojileri de geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Suyun elektrolizinde temiz su kaynakları kullanımının yerine doğrudan deniz suyu kullanımına dönük teknolojilerin gelişimi önemlidir. Ayrıca bu sistemlerin elektrik gereksiniminde alternatif temiz enerji kaynaklarından elde edilebildiği bütünleşmiş sistemlerin geliştirilmesi ile yeşil hidrojen üretilebilmektedir. Deniz suyunun tuzluluğunun giderilmesi amacıyla ters ozmos desalinasyon ve/veya elektrodializ (ED) sistemleri geliştirilerek tuzlu suyun desalinasyon ile tuzluluğunun azaltılarak elektroliz sistemlerinde kullanılması sağlanabilmektedir. Elektrodializ prosesinde kullanılacak olan anyon ve katyon değiştirici membranlarla hem derişik ve hemde seyreltik tuz çözeltileri elde edilebilmekte ve aynı zamanda hidrojen üretilmektedir. Hem elektrodializ ve hemde elektrolizörlerin fotovoltaiik (güneş) veya rüzgâr enerjisi ile entegre edilmesi ile hem maliyet azaltılabilmekte ve hemde yeşil hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca tuzlu suyun doğrudan elektrolizinin gerçekleştirildiği katotta hidrojen ve anotta klor gazı oluşumunun gerçekleştirildiği klor-alkali elektrolizörlerde yeşil hidrojen üretimi için kullanılabilir. Bu elektroliz sistemlerinin anodunda klorür yükseltgenmesi ile klor gazı oluşumunu katalizleyecek ve klora karşı yüksek kararlılığa sahip elektrokatalizörler kullanılabilir. Bu sistemlerde klor korozyonuna karşı yüksek dirençli elektrotların kullanımı büyük önem taşımaktadır. Özellikle anot elektrot olarak klor korozyonuna dirençli grafit, platin alaşımları veya titanyum alaşımları kullanılabilir.

Elektrodializ ve klor alkali prosesleri için hem anyon ve katyon değiştirici membranların geliştirilmesi ve hemde hem klor yükseltgenmesi ve hemde oksijen oluşum reaksiyonu (OER) ve hidrojen oluşum reaksiyonu (HER) için uygun elektrot malzemesi geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektrodializ sistemlerinde çoklu hücre çiftleri gerekmekte ve bu hücreleri birbirinden ayıran sıralı anyon ve katyon değiştirici membranlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemlerin ticarileşmesi için gerekli olan ölçek büyültmesi ile ilgili bazı problemler devam etmektedir. Ayrıca membranların kirlenme ile tıkanması ve seçicilik problemlerinin çözümü için yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Klor alkali proseslerinde kullanılacak iyon değiştirici membran ve yüksek kararlılık ve elektrokatalitik aktiviteye sahip elektrot malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Elektrodializ sisteminin anodunda ve katodunda gerçekleşen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonu için uygun elektrot malzemesi geliştirilmelidir. Bu amaçla asidik ve bazik ortamlarda yüksek kararlılığa, yüksek aktiviteye ve düşük HER ve OER aşırı gerilimine sahip elektrokatalizörlerin kullanıldığı elektrot malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Tuzlu

suyun elektrolizinde kullanılan klor-alkali prosesleri gibi elektrolizörlerde temel problem klor korozyonuna karşı ucuz ve yüksek dirençli elektrot ve elektrolitlerin geliştirilme ihtiyacıdır.

6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi

Sudan yeşil hidrojen üretiminde kullanılan elektrolizörlerin başında AWE, PEMWE ve SOMWE elektrolizörler gelmektedir. Kullanılan elektrolizörler çalışma koşullarına bağlı olarak farklı hücre bileşenleri, elektrolit sistemleri ve farklı elektrot sistemleri içermektedirler.

Sudan hidrojen üretiminde kullanılan teknolojisi gelişmiş sistemlerinin başında AWE'ler gelmektedir. AWE'ler, katot tarafında üretilen hidrojen ile katottan anoda elektrolit yoluyla hidroksit iyonlarının (OH^-) taşınması yoluyla çalışan elektrolizör türüdür. Elektrolit olarak sodyum veya potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanan elektrolizörler uzun yıllardır ticari olarak kullanılmaktadır. Ticarileşmiş AWE'lerin yaklaşık $100\text{-}400\text{ mA cm}^{-2}$ aralığında akım yoğunluğunda, 25°C ile 100°C aralığındaki sıcaklıklarda ve 1 ile 30 Bar basınç altında çalışabilmektedirler. AWE'lerde yaklaşık %30 KOH sulu çözeltisi elektrolit olarak kullanılmaktadır. Aspest temelli bir diyagramla anot ve katot bölümleri birbirinden ayrılmaktadır. Bu elektrolizörlerde demir ve nikel temelli elektrotlar kullanılabilir. Bu elektrolizörlerde demir ve nikel temelli elektrotlar kullanılabilir.

AWE'lerin en önemli problemi düşük hız kapasitesidir. Bu problemleri gidermek için özellikle farklı membran sistemlerinin (iyon solvate membranlar gibi) geliştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Gaz geçirgenliği prensibine dayalı bu teknolojiye, membranlardaki tıkanmalar zaten düşük olan hızı daha da düşürmekte dolayısı ile verimlilik üzerinde negatif etki yaratmaktadır. Bununla birlikte özellikle soy olmayan metaller kullanılarak yeni ucuz, kararlı ve aktif elektrot malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca bu sistemlerde kullanılan kalın gözenekli diyagramlardan kaynaklanan düşük hız kapasitesi de bu sistemlerin dezavantajlarından biri olarak görülmektedir. Kullanılan diyagram temelli membranların yüksek dirençlerinden kaynaklanan özellikle yüksek akım yoğunluklarında düşük potansiyel verimine sebep olmaktadır. Yüksek direnç yaratılan sistemlerde iyonik transfer hızı yavaşlar ve elektrotlar arası ideal görülen potansiyel farkına erişilemez. Elektrokimyasal olarak, başarılı/verimli bir elektroliz gerçekleşmesi için gerekli potansiyel stabil uygulanması güçleşir ve elektrotlar mekanik ve kimyasal olarak olumsuz etkilenirler. Ayrıca konvansiyonel alkali elektrolizörlerde kullanılan diyagramların gaz geçirgenlik problemleri de vardır. Alkalin teknolojisinin sanayi uygulama alanlarındaki öne çıkan dezavantajlarından biri de komponent bazlı alan problemidir.

Sudan hidrojen üretiminde kullanılan ve AWE'lere göre önemli avantajları olan diğer bir elektrolizör sistemide PEMWE'lerdir. PEMWE'ler temelde PEM yakıt pillerine çok benzer

konfigürasyona sahiptirler. Bir PEMWE'ün temel tasarımı, hücrenin merkezinde ince, proton ileten ve elektron yalıtkan PEM elektrolit bulunan iki yarım hücreden oluşur. PEMWE'ler, suyu bileşenlerine bozundurmak için elektrik kullanan, anot tarafında oksijen ve proton üreten bir elektrokimyasal enerji dönüştürücüdür. Anotta OER ile konsantrasyonu artan protonlar PEM elektrolitten geçerken katot tarafında elektronlar protonları indirgeyerek hidrojen üretir (HER). PEMWE'lerin temel bileşeni ve sistemin performansını belirleyen temel bileşen elektrolit olarak PEM membranının her iki yüzeyine HER ve OER reaksiyonlarını hızlandıracak elektrokatalizörler kaplanmasıyla membran elektrot takımı (Membrane Electrode Assembly (MEA) yapısıdır.

Kompakt PEMWE'ler, yüksek akım yoğunluğu, yüksek verim, geniş akım yoğunluğu penceresi ($\sim 500\text{--}2000 \text{ mA cm}^{-2}$), yüksek hidrojen saflığı ve büyük dönüşüm verimliliği dahil olmak üzere dikkate değer önemli avantajlara sahiptir. Ancak PEMWE'lerde kullanılan özellikle Pt grubu malzemelerden hazırlanan pahalı elektrokatalizörlerin, pahalı PEM elektrolitinin (NAFYON, perfluorosulfonic acid (PFSA) gibi) ve hücre yapı malzemelerinin kullanımı, yeşil hidrojen üretim maliyetini artırmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin çevresel etkileri de teknoloji geliştirilmesinde tartışmalara sebep olup, gelişimi ile ilgili yatırımlarda endişe yaratmaktadır. Bu sebeple PEMWE'lerde yeşil hidrojen üretim maliyetinin azaltılması için yeni PEMWE yapılarının tasarlanması, ucuz, kararlı ve yüksek elektrokatalitik aktiviteye sahip Pt grubu dışı yeni elektrokatalizörlerin geliştirilmesi ve yüksek iyonik iletken, elektronik yalıtkan, termal ve mekanik kararlılığa sahip yeni membranların geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Reaksiyon başlangıcındaki stabil olmayan dramatik bozunmalardan kaynaklı ısı kaybı/termal kayıplar genel olarak tüm elektrolizör teknolojileri için geliştirilmeye ihtiyaç duyulan sorunlardan biri olarak sayılabilir. PEM teknolojisinde ise alternatif yeni rakip teknolojilerine göre (örneğin SOMWE'ler) bu kayıplar daha yüksektir. İnovatif çalışma ve teknoloji iyileştirme sahalarında hem enerji verimliliği hem de teknoloji maliyeti konusunda bu alanda çalışmalara da ihtiyaç vardır.

PEMWE'de birim hücrenin temel bileşenleri olarak bipolar plakalar (BP'ler), gaz difüzyon tabakaları (GDL), PEM elektrolit ve elektrokatalizör ile modifiye edilmiş katot ve anot kullanılmaktadır. Ticarileşmiş Kompakt PEMWE'lerde Pt grubu elektrokatalizörlerin ve NAFYON gibi oldukça pahalı membranların kullanılması hidrojen üretim maliyetini artırmaktadır. PEMWE'lerin performansını artırmak için özellikle düşük gaz geçirgenliği, mükemmel proton iletkenliği, iyi su emme, düşük şişme oranı, olağanüstü kimyasal ve mekanik kararlılık, düşük maliyet ve yüksek dayanıklılık gibi temel özelliklere sahip yeni membranların geliştirilmesi gereklidir.

Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip, korozyon direnci yüksek, ucuz ve kolay işlenebilir yüksek performanslı GDL malzemelerini geliştirilmesi gerekmektedir. Bununla beraber yüksek kütle ve enerji transfer özelliğine sahip BP'lerin geliştirilmesi gerekmektedir. PEMWE'lerin ticari katalizörleri temel olarak Ir bazlı katalizörler (anot bölgesi) ve Pt bazlı katalizörlerdir (katot bölgesi). Katalizörlerin maliyetini azaltmak için, katalizörlerdeki asil metallerin miktarını azaltmak veya yüksek aktivite ve kararlılığa sahip yeni katalizörlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

PEMWE'lerde kullanılan GDL ve elektrokatalizörlerde karşılaşılan temel problemlere ek olarak, çeşitli alt başlıklarda görülebilen ticari çözüm odaklı son kullanıcıya sunulan "waste heat recovery units" ekipmanları ile ısı kayıplardan oluşan verimlilik sorununu ortadan kaldıracak ve/veya avantajlı duruma geçirecek çalışmalara da ihtiyaç vardır. Ters elektrodializ (RED) teknolojileri ile kombine edilebilen sistem çözümleri sözkonusu bu verimlilik problemlerinin çözümüne katkı sağlayabilecek yaklaşımlar olarak rapor edilmektedir.

Türkiye'de halihazırda bulunan altyapı, elektrolit harici, bahsi geçen bileşenlerin geliştirilebilmesi için yeterli olmakla birlikte sektördeki firmaların hidrojen pazarından haberlerinin olmaması yahut hidrojen pazarının ciddiyetinin farkına varmamaları sebebiyle bu alanlarda yapılan çalışmalar sınırlıdır. Hidrojen teknolojileri alanında endüstriyel bilincin artırılması ve firmaların bu alanlarda teşvikler ile desteklenmesi büyük önem taşımaktadır.

Sudan hidrojen üretiminde kullanılan ve AWE ve PEMWE'lere göre özellikle yerleşik güç sistemlerinde avantajları olan diğer bir elektrolizör sistemi SOMWE'lerdir. SOMWE'ler, sudan hidrojen üretmek için kullanılan tipik olarak 600°C ila 1000°C gibi yüksek sıcaklıkta çalışabilen sistemlerdir. Ayrıca SOMWE'ler, CO₂ elektrolizi ile sentetik bir yakıt olan CO üretimi içinde kullanılabilirler. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen reaksiyonlar, elektroliz için gereken elektrik enerjisine olan ihtiyacı azaltır. SOMWE'ler, yüksek verimlilik, yüksek sağlamlık, değerli metaller ihtiyacı duyulmaması ve yerel olarak bulunabilen seramik membranların kullanılması gibi avantajları nedeniyle araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. Ayrıca SOMWE'in termo-nötr çalışması, PEM ve alkalın elektrolizörler için gerekli olan yüksek soğutma gereksinimlerini de ortadan kaldırmaktadır. Anot ve katoda ilave olarak SOMWE'lerin en temel bileşenlerinden biri de gaz geçirmez ve elektron yalıtıcı olan itriya stabilize zirkonya (YSZ) oksit gibi iyon iletken elektrolit malzemesidir. SOMWE'lerde elektron ve oksit iyonu iletkenliği yüksek olan gözenekli malzemeler elektrot olarak kullanılmaktadırlar.

SOMWE'lerle hidrojen üretim maliyetlerinin iyileştirilmesi için yüksek verimlilikte su buharından hidrojen üretiminin gerçekleştirilebilmesi gerekmektedir. Bunun için özellikle SOMWE hücrelerindeki ohmik kayıpların azaltılması, yeni yüksek performanslı elektrolitlerin (skandia stabilize zirkonya (ScSZ) ve lantan stronsiyum galyum magnezyum oksit (LSGM) gibi

geliştirilmesi ile elektrolit kalınlığının optimizasyonu, termal döngülerde SOMWE yığın dayanıklılığını ve sızdırmazlığı artırılması, hidrojen/oksijen/buhar ortamında malzeme dayanıklılığının artırılması, ölçek büyütmesi sırasında karşılaşılan elektroliz yığın performans kayıplarının giderilmesi gibi temel alanlarda iyileştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda, alkali tip elektrolizörde yeni bir yaklaşım olarak zehirli asbest diyafram yerine anyonik iletkenliğe sahip polimerlerden oluşan anyon değişim membranlı elektrolizör (ADMWE) üzerinde Ar-Ge ve uygulama çalışmaları yürütülmektedir. Anyon değişim membranlarının sentezi için çok yüksek termal ve mekanik stabiliteye sahip polimerlerin kullanımı gerekmektedir ve hidroksit iyonlarını taşıyabilen katyon bölgeleri, iyonların iletiminden sorumludur. Bu teknikte AWE’de olduğu gibi hidroksit iyonları katottan anoda geçmektedir. Yüksek hidroksit iyon taşınımı, uygun iyon ileten kanalların oluşumuyla desteklenebilmektedir. İyonik iletkenlik, membranların içindeki su içeriğinin artırılmasıyla yükseltilebilir. Ancak, daha yüksek su içeriği veya su alımı, membranı şişirerek mekanik kararsızlığına neden olmaktadır. Membran içindeki su yönetimi, ADMWE’nde çok önemli bir çalışma alanıdır. İyonların membran içerisinde hareket edebilmesi için bir miktar serbest su bulunması gerekmektedir. Bu nedenle, maksimum aktivite elde etmek için membranların içindeki serbest ve bağlı su miktarını dengelemek gerekmektedir. Anyon değişim membranları kullanan su elektrolizi, %20-30 KOH/NaOH kullanan AWE’ye göre artık daha çok ilgi görmektedir. Bazı çalışmalarda 85°C’de 1,8 V’da 2,7 A/cm² lik bir performans görülmüştür. Bu yüksek performansla rağmen elektrokatalizörlerin ömrü ve dayanıklılığı düşük olduğu için iyileştirilmesi ve geliştirilmesi önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır..

Özetle, suyun elektrolizi mevcut durumda yenilenebilir elektrikle birleştirilebilen en olgun ve gelecek vaat eden bir yeşil, temiz hidrojen üretim yöntemidir. Termodinamik sınır olarak suyun oda sıcaklığında elektroliz yoluyla ayrışması için gereken enerji, kg hidrojen başına yaklaşık 40 kWh’dir. Bununla birlikte mevcut durumdaki teknolojik seviye; kullanılan teknoloji tipi, kapasite, tasarım ve işletme şartlarına bağlı olarak, bir kg hidrojen üretmek için yaklaşık 50-55 kWh elektrik enerjisi gerektirmektedir. SOMWE’ler yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 800°C) çalışması nedeniyle, harici bir ısı kaynağının mevcut olması durumunda (yaklaşık 10 kWh/kgH₂ ısı) termodinamik olarak daha yüksek verim değerine ulaşabilir (yaklaşık 40 kWh/kgH₂ elektrik tüketimi). Ancak verimlilikte, yüksek sıcaklığı korumak için ilave ısı gereksinimleri de hesaba katılmalıdır.

Bu kapsamda, başlıca elektroliz teknolojilerinin avantajlı ve dezavantajlı yönleri ile karşılaştırmalı bazı özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- AWE, hidrojen üretimi için düşük sıcaklıkta çalışan bir su elektroliz teknolojisidir ve megavat ölçeğinde hâlihazırda mevcut olan nispeten uygun maliyetli yığınları

İçermektedir. Alkali elektrolizörlerde asil metal katalizörleri kullanılmaz ve bunlar çok uzun kullanım ömrüne sahiptirler. Ana dezavantajları, alkalın elektrolizörlerin yalnızca nispeten düşük akım yoğunluklarında çalışabilmesi ve kısmi yüklerdeki esnekliklerinin sınırlı oluşudur. Alkalın elektrolizör sistemleri, kısmi yükler için zayıf dinamik davranış gösterdiklerinden güvenlik sorunu oluşturabilmektedirler. Bu açıdan, bu teknolojinin esnek çalışmaya uyarlanması konusunda geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

- PEMWE'leri, yüksek akım ve güç yoğunluğuna sahip olduklarından verimleri yüksektir. Yük değişimlerine karşı dinamik davranışı hızlı ve kısmi yük altında uygun şekilde çalışabilirler. Bu nedenle, kesikli ve değişken yüklerde çalışabilen RES uygulamalarına karşı son derece uygun ve bağlantı kolaylığı sunmaktadırlar. Ana dezavantajları, kısmen pahalı ve nadir platin grubu metallerden oluşan katalizörleri kullanması, katalizör kaybı ve membran ömrünün sınırlı oluşu nedenleriyle maliyetinin nispeten yüksek olmasıdır.
- SOMWE'leri, bu teknolojinin kullanımıyla ilgili daha yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzemeler kullanılmalıdır. Elektrokimyasal hücreyi oluşturan seramik malzemeler için yüksek sıcaklıklara ulaşma ve termal şoklardan kaçınma gerekliliği nedeniyle ilk devreye alma süreleri uzundur. Bu nedenle, sınırlı esnekliğe sahiptirler. SOMWE'ler ayrıca nadir toprak metalleri gibi kritik ham maddelerin kullanımını gerektirir. Büyük ölçekte uygulamalar için uygun bir teknolojik seviyeye ulaşmış olmasına rağmen, özellikle kullanılan malzemeler ile ilgili zorlukların giderilmesi ve teknolojiyi büyük ölçek uygulamalarda kullanıma yönelik geliştirme çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir.
- İki ana düşük sıcaklıklı elektrolizör teknolojisine (AWE ve PEMWE) ek olarak, son yıllarda Anyon Değişimli Membran elektrolizörlerin (ADMWE) geliştirilmesi çalışmaları yoğunluk kazanmıştır. Bu teknoloji, katı bir elektrolit kullanarak alkali bir ortamda çalışmaktadır. Prensipte olarak bu durum, katı elektrolitin varlığı nedeniyle platin grubu olmayan metal katalizörlerin kullanımını ile yüksek saflıkta hidrojen üretimi anlamına gelmektedir. Bu teknoloji alanında, halen yalnızca bir Avrupalı firma (Enapter) birkaç kW kapasiteli ürünleri pazara sunmuş olmakla birlikte, şu anda nispeten düşük bir Teknoloji Hazırlık Seviyesindedir (THS 3-5)'dir.
- AWE ve PEMWE'ler, ticari olgunluğa ulaşmış ve onlarca MW güce ulaşan uygulamalarda kullanılmış veya kullanılacak teknolojilerdir.
- SOMWE'ler hâlihazırda gerçek saha ortamında test edilmiştir. Planlanan uygulamalar ile yakın zamanda birkaç yüz kW'dan MW ölçeğine kadar uygulamalara ulaşılabileceği öngörülmektedir.

Elektrolizör Teknikleri	AWE	ADMWE	SOMWE	PEMWE
Taşınan iyonlar	OH ⁻	OH ⁻	O ⁻²	H ⁺
Elektrolit	% 20-40 KOH/NaOH	Anyon değişim membranı	Seramik membran	Proton değişim membranı
Sıcaklık (°C)	40-90	40-60	500-850	20-90
H ₂ Basıncı (bar)	10-30	10-35	30	10-150
H ₂ saflığı (%)	99,3 - 99,99	99,99	99,9999	99,9999
Akım yoğ. (A/cm ²)	0,2-2,5	0,2-0,8	> 3,0	0,2-8,0
Ömür (saat)	100 bin	< 5 bin	< 10 bin	50 -100 bin
Kapasite (kW)	3-3500	< 50	< 100	1 - 5000
Sistem maliyeti (€/kg)	800-1300	NA	NA	1200-2000
Verim (%)	50 - 70	40	> 80	50 - 80
Avantajları	Olgun seviyede, düşük maliyet	Ar-Ge seviyesinde, ucuz katalizör, düşük aşındırıcılık, kompakt tasarımı, düşük maliyet	Yüksek verim, yüksek çalışma basıncı	Yüksek (Akım yoğunluğu, H ₂ üretim hızı, H ₂ saflığı, basınç), kompakt tasarımı
Dezavantajları	Düşük akım yoğunluğu, gaz geçişi, düşük basınç, aşındırıcı sıvı elektrolit	Laboratuvar seviyesinde düşük akım yoğunluğu, membran bozulma, fazla katalizör yükleme	Düşük ömür	Yüksek bileşen maliyeti

Bu kapsamda; ilgili teknolojik alanlarda yapılması öngörülen Ar-Ge faaliyetleri ve teknoloji gösterim alanları aşağıda verilmiştir.

Orta ve uzun dönem içerisinde ekonomik faydaya dönüşecek faaliyetler:

- Tüm elektroliz yöntemleri için elektrokatalizörlerde ve MEA'larda kullanılan kritik ham maddeler yerine yeni elektrotların ve membranların geliştirilmesi. Bunun yanında, akım yoğunluğunu, kullanım ömrünü ve verimliliği artırmaya yönelik yenilikçi hücre tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi, düşük maliyetli metalik malzeme kaplamaların ve contaların geliştirilmesi, entegre montaj konseptleri, termal yönetim ve yenilikçi üretim süreçlerinin geliştirilmesi,
- Suyun elektrolizi için yeni katalizörlerin (düşük pilatin grup malzemeli (PGM) veya PGM'siz) geliştirilmesi,
- Döngüsel ekonomi konseptine uygun olarak (enerji, kaynaklar/malzeme, geri dönüştürülebilirlik) çevresel etkilerin en aza indirilmesi,
- AWE: soy metaller kullanmadan akım yoğunluğunu artırarak daha kompakt yığın tasarımının geliştirilmesi,
- PEMWE: Katalizörlerdeki değerli metal içeriğini azaltmak ve geri dönüşümü göz önünde bulundurarak PGM'siz katalizörlerin geliştirilmesi, yeni/gelişmiş membranların geliştirilmesi, mevcut akım yoğunlukları ve çalışma basınçlarını artırılırken gaz geçişini azaltılması,
- SOMWE: Yığın çıkışı hidrojen basıncının artırılması, yığın çıkışında iyileştirilmiş hidrojen saflığının sağlanması, yeni yığın tasarımları ve gelişmiş imalat tekniklerinin geliştirilmesi,
- ADMWE: Mevcut malzemelerin iyileştirilmesi, yeni membranların geliştirilmesi, KOH konsantrasyonunun azaltılması, ölçek/kapasite artışının sağlanması, atık minimizasyonu / döngüsellüğünün sağlanması,
- Elektrolizörlerde saf olmayan su kullanım yöntemlerinin geliştirilmesi.

Kısa ve orta dönem içerisinde ekonomik faydaya dönüşecek faaliyetler

Orta ve uzun dönem hedefleri kapsamında elektrolizör maliyetlerini azaltmak ve temel performans göstergelerini geliştirmek için yukarıda önerilen temel ve uygulamalı Ar-Ge alanlarındaki çalışmalar ile, kısa ve orta dönem çalışmaları için:

- Yüksek performans için hücre tasarımının geliştirilmesi veya iyileştirilmesi, ısıl ve süreç akışı yönetimi yoluyla hücre/yığın sağlamlığının artırılması,
- Yüksek güçlü sistemler için daha geniş aktif alanlı hücre/yığın bileşenlerinin geliştirilmesi,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla optimize edilmiş elektriksel entegrasyon uygulamaları için parazitik kayıpları ve maliyeti azaltmak için yenilikçi sistem tasarımları ve iyileştirilmiş tesis bileşenlerinin geliştirilmesi (örn. amaca yönelik doğrultucular, bütünleşmiş soğutma sistemleri, elektrikli ısıtıcılar ve ısı eşanjörleri),
- Elektrolizör sistemlerinin izlenmesi, otomasyon ve kontrolü için yöntem ve sistemlerin geliştirilmesi,

- Elektrolizör çıkışı basınçlandırma ihtiyacını önlemek veya azaltmak için yüksek basınçlı yığınların geliştirilmesi,
- Elektroliz teknolojisinin büyük ölçekte ve istenen performans değerinde uygulanmasına yönelik tasarım, maliyet, verim, ömür vb doğrulamaları için ölçek büyütme ve dinamik çalışma gösterim çalışmalarının gerçekleştirilmesi,
- Yeşil hidrojen (hem açık hem de şebeke dışı) kullanılarak sentetik petrokimyasallar, amonyak, metanol vb üretimine yönelik pilot ve demo ölçekte sistemlerin geliştirilmesi.

Bu kapsamda hedeflenen performans göstergeleri ve sayısal değerleri aşağıda verilmiştir.

No	Performan Göstergesi	Birim	PEMEL	AEL	KOEL	ADMEL
1	Elektrik tüketimi	kWh/kg H ₂	52	49	40 (Isı ihtiyacı 10)	53
2	İlk yatırım maliyeti	Avro/(kg/gün)	1550	1000	2000	1200
		Avro/kW	700	480	1250	550
3	İşletme maliyeti	Avro/(kg/gün/yıl)	30	43	130	27
4	Rolantiden çalışma süresi	saniye	1	30	300	15
5	Soğuktan devreye alma süresi	saniye	10	900	3600	450
6	Bozulma (degradation)	%/1,000 saat	0,15	0,11	1	0,9
7	Akım yoğunluğu	A/cm ²	2,4	0,7	0,85	0,6
8	Katalist olarak kritik hammadde kullanımı	mg/W	1,25	0,3	-	0,4

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünyada THS: 6-9 arasındadır. Örneğin Almanya’da Eisenhuth firması yakıt pilleri ve elektrolizörler için elektrotlar üretmektedir [2]. Dioxide Materials firması farklı elektrolizörler ve bu sistemlerin bileşenlerini üretilip pazarlamaktadır [3].

Türkiyede ise THS: 3-5 arasındadır. Membran geliştirme çalışmaları ise 1-2 düzeyindedir. Elektrolizörler için elektrot geliştirilmesi ve laboratuvar ölçekli elektrolizörler ile ilgili AR-GE çalışmaları yürütülmektedir. Örneğin TEKSİS anahtar teslimi yeşil hidrojen üretim tesisleri ve hidrojen dolun istasyonları kurmaktadır. Ayrıca elektroliz yöntemiyle H₂ üretecek ölçeklenebilir ve modüler, fiyat rekabetçi ticari bir ürün geliştirilmek üzere projeler yürütmektedir [4].

Elektrolizör verimliliğini artırarak yeşil hidrojen üretim maliyetini düşürmede yeni teknolojik yaklaşımlar ticarileşmeye başlamıştır. Örneğin, 2017’de Kaliforniya Üniversitesinden (University of Southern California USC) Wei Wu ve Yifei Wang, su ayrışması için nanoelektrot teknolojileri için patent almıştır. Patent olarak yayımlanması sonrasında “Nanogap” elektrokimyasal hücre teknolojisi uygulamalarında inovatif uygulamalarla verimlilik arttırmaya yönelik elektrolizör çalışmaları hız kazanmıştır. Dünyada THS 2-4 arasında Eisenhuth firmasına ait elektrot sistemleri bulunmakta ancak yüksek üretim kapasitelerinde uygulanmamıştır. Dünyanın en verimli elektrolizörünü geliştirdiğini söyleyen Avustralyalı start-up Hysata firması ise alkalın ve PEM sistemlerine rakip olarak LOCH (Liquid Organic Hydrogen Carriers) konusunda devrim yaratacaklarını iddia ettikleri THS 5-8 arasındaki kılcal beslemeli elektrolizör (Capillary-Fed Electrolyser (CFE)) teknolojisini duyurmuştur. Yüksek verimli elektrolizörler için endüstri standardı 50kWh/kg iken kılcal beslemeli elektrolizörünün kg hidrojen başına sadece 41,5 kWh elektrik gerektirmesi ile oldukça rekabetçi ve hidrojen üretim maliyetleri için gelişime açık yeni bir teknoloji fikri sunmaktadır.

6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyesi (THS)

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Desalinasyon prosesleri veya elektrodializ prosesleri ile tuzlu suyun tuzluluğunun giderilmesi ve bu suyun elektrolizörlerde kullanımı için gerekli olan sistem bileşenleri ile ilgili dünyadaki THS 4-8 seviyelerindedir. Örneğin INEOS firması geliştirdikleri BICHLOR™ ELECTROLYSER ürünleri ile tuzlu suyun elektrolizi ile NaOH, klor gazı ve hidrojen üretimi sağlamaktadır [5]. Aynı firma modüler membranlı elektrolizörlerle tuzlu suyun elektrolizinde kullanılabilecek sistemler geliştirmiştir. Ayrıca ters ozmoz sisteminin elektrolizörlerle kombinasyonu ile deniz suyundan hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Türkiyede bu konuda AR-GE çalışmaları yürütülmektedir ve THS 3-5 arasındadır. Türkiye de deniz suyundan elektrolizle hidrojen üretimi amacıyla elektrolizör geliştirilmesi konusunda bir ÜR-GE çalışmasına rastlanılmamıştır. Ancak klor-alkali proseslerinin kullanıldığı sektörler (AKKİM gibi) vardır.

6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünyada farklı firmalar tarafından farklı ölçeklerde ve konfigürasyonlarda alkali elektrolizörler üretilmekte ve pazarlanmaktadır. Dünyada THS: 6-9 düzeyindedir. Örneğin peric718 firması farklı ölçeklerde elektrolizörler üretmektedir [6]. Diğer bir örnek ise Nel Hydrogen firması tarafından geliştirilerek dünya genelinde 3500’den fazla pazarlanan elektrolizör sistemleridir [7].

Almanya’daki Amprion ve gaz ağı operatörü OGE, 2023 yılında devreye girmesi hedeflenen toplam 150 milyon euro tutarlı 100 MW’lık bir elektrolizör ve Almanya’nın kuzeybatısındaki özel bir hidrojen boru hattı için yatırım planı sunmuştur. VNG, Uniper, Terrawatt ve DBI tarafından Almanya’daki bir kimya kompleksinin yakınında, 50 milyar metreküp depolama alanı ve özel bir hidrojen boru hattı dahil olmak üzere, elektrolizörlerle birleştirilmiş 40 MW’lık bir rüzgâr santrali planlanmaktadır. ITM Power ve Linde ile oluşturulan konsorsiyum ile Shell’in Köln yakınlarındaki Wesseling rafinerisinde 10 MW’lık polimer elektrolit membran (PEM) elektrolizörü 2020 yılında devreye alınmıştır. Almanya Araştırma Bakanlığı Ocak 2021’de, büyük elektrolizörlerin üretimine, deniz üstü rüzgâr santralleri ile hidrojen üretiminin birleştirilmesine ve hidrojenin taşınmasına odaklanan yeşil hidrojen üzerine üç büyük ölçekli araştırma projesine toplam 700 milyon euro destek verildiğini duyurmuştur. Avustralya’nın Pilbara bölgesinde geliştirilen 15 GW kapasiteli güneş ve rüzgâr santrali yatırımları ile elde edilecek elektriğin elektroliz yoluyla hidrojen üretmek için kullanılmaktadır. Fransa’da enerjiden gaza dönüştürme projesi olan Les Hauts de France projesi, beş yıllık bir süre içinde her biri 100 MW’lık beş hidrojen elektrolizör ünitesi inşa etmeyi hedeflemektedir. Exxon rafinerisinin yanında kurulacak Port-Jérôme tesisi, yakıtların kükürt gidermesi veya gübre üretimi için petrokimya endüstrisine (Exxon, Total, Yara vb.) hidrojen sağlamayı hedeflemektedir. Kanada’da Air Liquide şirketi, 2021 Ocak ayında hidroelektrik kullanarak düşük karbonlu

hidrojen üretmek için 20 MW kapasiteye sahip dünyanın en büyük PEM elektrolizörünün açılışını yapmıştır. Danimarkalı Orsted, kuracağı 2 MW'lık tesiste deniz üstü rüzgâr enerjisi kullanarak günde 1.000 kg yeşil hidrojen üretmeyi planlamaktadır.

Türkiyede ise THS: 3-5 arasındadır. Elektrolizörler için elektrot geliştirilmesi ve laboratuvar ölçekli elektrolizörler ile ilgili AR-GE çalışmaları yürütülmektedir. Örneğin TEKSİS, temsilciliğini yaptığı ürünler ile Anahtar Teslimi Yeşil Hidrojen Üretim Tesisleri ve Hidrojen Dolum İstasyonları kurmaktadır. Ayrıca, elektroliz yöntemiyle H₂ üretecek ölçeklenebilir ve modüler, fiyat rekabetçi ticari bir ürün geliştirilmek üzere projeler yürütmektedir [4]. TÜBİTAK MAM bünyesinde alt bileşenler ile birlikte basınçlı elektrolizör sistemi geliştirme çalışmaları yer almaktadır. ASPİLSAN Enerji firması ise MEA, katalizör sentezi, yakıt hücresi ve elektrolizör sistem tasarımı konularında çözümler sunmaktadır. MEA ve elektrokatalizörler için THS 7 seviyesinde çözüm sunulurken, basınçlı (<10 bar) ve atmosferik PEM tipi elektrolizör yığınları için sunulan çözüm THS 5 seviyesindedir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi

Almanya'da Eisenhuth firması yakıt pilleri ve elektrolizörler için elektrotlar üretmektedir (<https://eisenhuth.de/en/products/>). Dioxide Materials firması farklı elektrolizörler ve bu sistemlerin bileşenlerini üretip pazarlamaktadır (<https://dioxidematerials.com/>). Türkiye'de ise elektrokatalizör çalışmaları laboratuvar ölçeğinde olmakla birlikte üretilen elektrokatalizörler elektroliz prosesinde kullanıma yönelik istekleri karşılayabilecek niteliktedir. Örneğin ASPİLSAN Enerji firması MEA hazırlanmada kullanılacak katalitik malzeme üretimini gerçekleştirebilmektedir.

6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler: INEOS firması geliştirdikleri BICHLOR™ ELECTROLYSER ürünleri ile tuzlu suyun elektrolizi ile NaOH, klor gazı ve hidrojen üretimi sağlanmaktadır [8].

6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi

Dünyada, farklı firmalar tarafından farklı ölçeklerde ve konfigürasyonlarda elektrolizörler üretilmekte ve pazarlanmaktadır. Elektrolizör üreten firmaların başında Air liquide, Plug Power, Elogen, ITM Power, Nel Hydrogen, Bloom Energy, Teledyne Technologies, ve Siemens Energy gelmekte olup; aşağıdaki Tablo'da bazı firmaların ürün teknik özellikleri verilmiştir. Örneğin Plug Power firması farklı ölçeklerde modüler PEM elektrolizörler ve bileşenlerini üretmektedir [9]. Plug Power firması 200 Nm³/saat ile 2,000 Nm³/saat arasında hidrojen üretiminin gerçekleştirilebileceği PEM elektrolizör sistemleri üretmektedir. ITM Power firması 707 kW ile saatte ~11 kg hidrojen üretebilen tek yığın en küçük elektrolizörler ile saatte 90 kg hidrojen üretebilen PEM elektrolizörlerine kadar değişik ölçeklerde sistemler üretmektedir [10].

INEOS firması BICHLOR™ ELECTROLYSER markası ile dünya genelinde 35 ülkede bipolar membran temelli PEM elektrolizörler kurmaktadır [8]. CSIC enstitüsü (Purification Equipment Research Institute of CSIC of China Shipbuilding Industry Corporation) farklı ölçütlerde PEM elektrolizörleri üretmektedir [11]. Nel Hydrogen firması dünya genelinde 3500'den fazla elektrolizör pazarlama trajına ulaşmıştır [7].

Türkiyede farklı araştırma gurupları tarafından elektrolizör ve elektrolizör bileşenlerinin geliştirilmesi ile ilgili farklı çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin Erciyes Üniversitesi H₂FC Hidrojen Enerjisi Araştırma Grubu tarafından nikel ve alaşımları ile kaplanan 3D baskılı elektrotların geliştirilmesi, PEM elektrolizörlerde oksijen oluşum reaksiyonu için gaz difüzyon elektrotu geliştirilmesi, PEM elektrolizörler için yenilikçi anot gaz difüzyon tabakaları geliştirilmesi ve PEM elektrolizörler için oksijen oluşum reaksiyonlarında katalizör geliştirilmesi alanlarında projeler yürütülmektedir. TÜBİTAK MAM bünyesinde elektrolizör geliştirme çalışmaları kapsamında PEM tipi elektrolizör geliştirilmesi amacıyla korozyona dayanıklı, düşük maliyetli, uzun ömürlü, 10 kW gücünde ve Teknolojik Hazırlık Seviyesi (THS) 7 olan yerli PEM Tipi bir elektrolizör bileşenleri ve sistemi geliştirmek ve laboratuvar ortamında çalıştırarak saha uygulamasına hazır hale getirmek amaçlanmaktadır.

Hidronerji, Hidrojen ve Enerji Sistemleri Ltd. Şti. firması TÜBİTAK destekli "Hastaneler İçin Güneş Enerji Kaynaklı PEM Yakıt Pili Üretim Tesisi Kurulması ve Yüksek Basıncılı Elektrolizör Geliştirilmesi" Projesi ile PV-elektrolizör-yakıt pili bileşenlerinden oluşan bir enerji dönüşüm sistemi geliştirme çalışmaları yürütmektedir [12]. ASPİLSAN Enerji ve XGEN, Yeşil ve Mavi Dönüşüm Programı Kapsamında İzmir Kalkınma Ajansı Desteği ile "İnovatif Küçük Ölçekli Rüzgâr Türbini ile Enerjilendirilmiş Yeşil Hidrojen Üretimi" projesini yürütmektedir. Proje kapsamında 2 kW'lık yerli PEM elektrolizörü geliştirecektir [13]. ASPİLSAN Enerji firmasının halihazırda prototip seviyesinde bulunan PEM tipi elektrolizör hücre ve yığınları bulunmaktadır.

Tablo 5.3. Dünyada elektrolizör üreten bazı firmalar ve ürünlerinin teknik özellikleri

Firma Adı	Elektrolizör Tipi	Kapasite	Verim kWh/kg H ₂	Basınç, Bar
Bloom Energy	SOWE	7,8 kg/sa H ₂ (360 kW modül ile)	46 (120 °C harici buhar sağlanması durumunda 39)	0-0,05
Cummins Inc	PEMWE	8,96 kg/sa H ₂	55-60	10
Cummins Inc	PEMWE	359 kg/sa H ₂	<51	30
Elogen	PEMWE	11,6 kg/sa H ₂	48	na
Enapter	ADMWE	2,5 kW	53,8	35
Geen Hydrogen System	AWE	8,1 kg/sa H ₂	na	35
ITM Power	PEMWE	600 kW-2 MW	na	20
John Cockerill	AWE	89 kg/sa H ₂	52	30
McPhy Energy SA	PEMWE	71,4 kg/sa H ₂	50,4	30
NEL	PEMWE	439 kg/sa H ₂	50,7	30
Plug Power	PEMWE	90 kg/sa H ₂	49,9	40
Siemens Energy	PEMWE	100-2000 kg/sa H ₂	49,3	35
Sunfire	AWE	199 kg/sa H ₂	52,6	30
ThyssenKrupp	AWE	357 kg/sa H ₂	50,4	0,3
Giner Inc	PEMWE	2.000 kW	54,9	40
Hydrogenic	PEMWE	1500 KW	40,3-50,4	30
Proton OnSite	PEMWE	2000 kW	56	30
H-TEC	PEMWE	1000 kW	53,8	15-30

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

- 6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi**
- 6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi**
- 6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi**

6.1.a-6.1.c için;

Kimya, fizik, kimya mühendisliği, malzeme ve metalurji mühendisliği, makina mühendisliği ve elektrik elektronik mühendisliğinden uzmanlar ile enerji temelli sektörlerin biraraya gelip çalışmaları gerekmektedir.

Ülkemizdeki enerji alanında AR-GE ve ÜR-GE yapan firmalar (ASPILSAN, SOCAR, TÜPRAŞ gibi), araştırma geliştirme enstitüleri ve TÜBİTAK MAM gibi araştırma merkezlerin biraraya gelmesi nihai hedefe ulaşmada büyük bir önem teşkil etmektedir.

Bunlara ek olarak kimya firmalarının elektrokatalizör ve elektrolit üretimi ve geliştirilmesi alanlarında çalışma yapmaları kritik önem taşımaktadır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

- 6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi**

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri artırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi işbirliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Ayrı yürüyen projeler, büyük bir platform bünyesinde eş güdüm içinde yapılacak projeler vb. çalışmalar da bu konunun gelişmesine katkıda bulunacaktır.

Bu noktada hidrojen teknolojileri özelinde kurulan kobi ve büyük ölçekli firmaların da yararlanabileceği bir fon mekanizması kurularak bu fonun bir platform tarafından yönetilmesiyle bir hidrojen teknolojileri ekosistemi oluşturulması uluslararası teknoloji seviyelerinin yakalanması açısından büyük önem taşımaktadır.

6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Bölüm 6.1.a'da bahsi geçen üniversite, kamu ve endüstrinin bir arada aynı ortak paydada görev alması hidrojen teknolojilerinin uluslararası seviyede gelişmesine olanak sağlayacaktır.

6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi

Bölüm 6.1.a'da bahsi geçen üniversite, kamu ve endüstrinin bir arada aynı ortak paydada görev alması hidrojen teknolojilerinin uluslararası seviyede gelişmesine olanak sağlayacaktır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

6.1.a. Elektroliz proseslerinde gerekli olan elektrot/elektrokatalizör ve elektrolit geliştirilmesi

Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl; Kısa ve orta vade

Ayırılması gereken tahmini bütçe: 10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

6.1.b. Elektrokimyasal yöntemle deniz suyundan desalinasyonla ve yenilenebilir elektrik enerjisi kullanımı ile verimli saf hidrojen eldesine yönelik teknoloji geliştirilmesi

Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl; Kısa ve orta vade

Ayırılması gereken tahmini bütçe :10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

6.1.c. Yeşil hidrojen üretimi için elektrolizör tasarımı, üretimi ve elektroliz proseslerinin iyileştirilmesi

Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl; Kısa ve orta vade

Ayrılması gereken tahmini bütçe :10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamu teşviklerinin sağlanması ve sanayi içerisindeki iş birliklerinin artırılmasına yönelik birleştirici rolü üstlenmesi. Kamunun gerekli destekleri (sübvansiyon ve vergi muafiyeti gibi) sağlayıp özel sektör için cazip hale getirmesi.

Sanayi iş birliğindeki Ar-Ge çalışmaları ve destek süreci sadece elektrolizör geliştirme alanında değil, tüm değer zincirinin yaratılıp Türkiye geneline yayılmasında rol oynaması hedeflenmelidir. Elektrolizör teknolojilerindeki fiziksel ve kimyasal süreç iyileştirmelerinin uygulama alanları yaratılarak farklı birçok sektör oyuncusunu hem mali hem teknolojik açıdan bir araya getirmek kritik bir önem arz etmektedir. Dünyada başarılı uygulamalarına rastlanan yeşil hidrojen vadileri, hub'ları ve değer zinciri yaratma girişimleri takip edilerek, Türkiye'de bir benzerini oluşturma girişimleri gerek Ar-Ge projeleri ile gerekse akademik çalışmalar ile desteklenmelidir. Tüm sektörlerin ortak paydada buluşması, yeşil hidrojen özelindeki ticari arz/talep dengesinin saptanarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Ülkemiz için olgunlaşmış alt yapı hazırlığının otuz yılı aştığı DG baz alındığında, yeşil hidrojen için hem üretimde hem de pazar içerisinde yer edinilmede daha hızlı ve sağlam adımlarla ilerlenmesi gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Hidrojen yol haritasının oluşturulması. Hidrojen üretimi ve kullanımı konularında teşvik edici mevzuatlar oluşturulmalıdır. Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterli değildir. Kısa ve orta vadede üretim, test ve sertifikasyon altyapıları oluşturulmalıdır. Örneğin TÜBİTAK önderliğinde makul ücretler karşılığında sertifikasyon ve test hizmetlerinin sunulması gerekmektedir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde yeterli düzeyde yetkinlikte AR-GE insan kaynağı mevcuttur. ÜR-GE için insan kaynağı desteklerine ihtiyaç vardır.

Destek ve Teşvikler

Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir. Oluşturulacak teşvik ve destek mekanizmalarında

endüstrideki paydaşların ve üniversitelerin iş birliği zorunlu kılınmalıdır. Böylelikle ülke çapında hidrojen teknolojileri üzerine tecrübenin hızlı ve kümülatif şekilde artırılması sağlanmalıdır. Ayrıca yetişmiş insan kaynağının artırılması için sanayinin ihtiyacını karşılayacak projelerin üniversitelere yaptırılması ve bu projelerin %100 desteklenmesi gerekmektedir. Bu sayede sanayi paydaşlarına ekonomik olarak yük bindirilmemesi ve sanayideki eforun ürün odaklı olması amaçlanmalıdır.

Diğer

Hidrojen değer zinciri yaratılması yolundaki adımlar

Hidrojen değer zinciri, hidrojenin üretiminden depolanmasına, taşınmasına ve farklı kullanım alanlarındaki hidrojen uygulamasına kapsayan hem ticari hem de teknik seviyede canlı kalabilen bir ekosistemdir. Bu ekosistemin en önemli parçalarından birinin hidrojen üretimi olması ile beraber, hidrojenin değer kazanabileceği ve kullanım alanı ile gelişerek ileri teknolojilerle destekleneceği bütünsel bir bakış açısı gereklidir. Ürün olarak sunulan hidrojenin gerek iç pazarda gerekse dış pazarda alternatif enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için, enerji ihtiyacının en çok olduğu motorlu taşımacılık, evsel/ısınma ihtiyaçları ve endüstriyel uygulamalarda gözlemlenip denenmeli ve gerekli yatırım destekleri ile ülke ekonomisi ve ihtiyacına yönelik spesifik yollarla ilerleyebilmelidir.

Hali hazırda Türkiye’de üretim ve uygulama alanı kısıtlı olan yeşil hidrojenin maddi önemini arttırılmasına, üretim maliyetlerinin düşürülmesine ve son kullanıcı için alt yapısının oluşturulmasına ihtiyaç vardır.

Üretimi iyileştirilse bile yeşil hidrojenin kullanım alanlarına ulaşımı, depolanabilirliği, güvenliği ve enerji kaynağı olarak kullanımında kritik teknolojik boşluklar vardır. Dünya üzerindeki çalışmalardan da görülebileceği gibi hidrojenin taşınması ve depolanması maliyetli bir süreç olmakla beraber, henüz ticari olgunluk seviyesine kâr amaçlı kazanıma tam olarak dönüşmemiştir.

Hidrojenin kararsız bir gaz olması sebebi ile yaşanan sorunların yanı sıra, bu sorunlardan uzaklaşmada yardımcı yeni değerli ürün e-fuel teknolojilerine (methanol, amonyak vb. depolanabilir kimyasal üretim teknolojileri) yönelim olsa da temeldeki hidrojen transferi sorunu çözülememiştir. Saf hidrojenin iletimi için gerek duyulan boru hattı mühendislik çalışmaları, katı yer altı depolama alt yapıları, üretimi ucuzlaşan ve verimliliği artan yeşil hidrojen hedefleri için önemli değerlerden birkaçı olarak söylenebilir.

Değer zinciri yaratma ve zincir bağlarını geliştirmeye yönelik tüm çalışmalar hizmet ettikleri alanlara spesifik verileri sağlayarak kritik süreçlerde atılması gereken Ar-Ge adımlarının kararlılığını ve hızını arttıracaktır. Fizibiliteelerde düşük üretim maliyetlerine sahip hidrojeni

yaratmak kadar kullanım alanlarına hazır hale gelebilmek de endüstriyel Ar-Ge çalışmaları için gereklidir. Karbon salınımını azaltmaya yönelik sanayi uygulamalarında verimli kullanım alanı yaratılmayan hidrojenin, üretiminde hedeflenen finansal avantajların aksine uzun vadede daha maliyetli süreçlere sebep olabilir.

Diğer taraftan, değer zinciri bakış açısı ile sunulan Ar-Ge yaklaşımlarında, teknolojik gelişim süreçleri daha hızlı ve hedefe yönelik ilerleyerek, kısa vadede ürün olarak değer kazanmasına imkan vermektedir. Örneğin ağır taşımacılık sektöründe ihtiyaç duyulan parametreler hidrojen üretim bandından depolanmasına kadar olan yolculukta teknoloji çeşitliliğine sebep olmuş güzel bir uygulama örneğidir. Ağırlık, basınç, menzil vb. limitlere sahip otomotiv sektörü için yeni geliştirilen kompozit malzemeler, sıvı hidrojen depolama teknikleri ve uygulanabilirlikleri her geçen gün önem kazanmakta ve gelişimine hızla devam etmektedir.

Özellikle Türkiye’de yapılacak yeşil hidrojen sanayi iş birliğindeki Ar-Ge projeleri ve yenilik temellerinde, bütünsel ürün değer kavramına yer verilmesi, veri eksikliğinden kaynaklı alt yapı ve uygulama sorununu çözmeye yönelik teknolojik gelişim adımlarının atılmasında önemli bir rol üstlenecektir.

Hidrojen vadileri/hub’ları, değerli ürün olarak yeşil hidrojenin kullanım alanını genişletirken geliştiren, hidrojen ekosistemini canlı tutmayı hedefleyen yenilikçi Ar-Ge projelerinin başında gelmektedir. Dünya çapında 2022 itibari ile 40’tan fazla örneği bulunan Hidrojen vadileri ile hidrojenin üretiminden, taşınmasını, depolanmasını ve son kullanıcıya ulaşmasını içeren THS 6-9 arası tüm teknolojik uygulamalara yer verilir.

2022 Avrupa hidrojen haftasında altı çizilerek belirtilen hedef; vadi ve hub’lar ile yaratılan bölgesel değer zincirlerini birbirine bağlayarak, dünya genelinde bir hidrojen teknolojisi teması oluşturmaktır. Yenilikçi Ar-Ge çalışmalarının ve teknolojik alt yapı hazırlıklarının vadiler arası desteklerle hızlanmasının dünya çapında hedeflenen karbonsuzlaşma yoluna katkısının önemli olacağı bilinmektedir. Bu sebeple hem Avrupa Hidrojen birliğinin hem de ülkemizde Tübitak’ın destekleri ile uygulanan bölgesel PDA (Project Development Assistance) çalışmaları yapılmaktadır.

Günümüzde Türkiye’de hayata geçirilmiş bir proje örneği bulunmasa da AB Ufuk 2022 programı kapsamındaki Hidrojen Vadisi küçük ölçek çağrısına Türkiye’den biri Tüpraş’ın koordinatörlüğünü üstlendiği iki ayrı konsorsiyum oluşturulmuş ve başvurusu yapılmıştır. THS 6-8 arası kurgulanan hidrojen değer zinciri oluşturmada sanayi ve akademi Ar-Ge yaklaşımları açısından büyük bir adım atılmıştır.

Dünya çapında Ar-Ge projesi olarak vadilere önem vermiş, hayata geçirmiş ülkeler arasında Almanya, Hollanda, İskoçya, Polonya, USA, Şili gibi ülkeler sayılabilir. Destekli Ar-Ge projelerine ise Heavenn, BigHit, Hyland, GreenHysland gibi örnekler verilebilir.

Üretim, taşıma, depolama ve karbon emisyonu anlamında en kritik seviyelere sahip tüm endüstriyel uygulama (demir-çelik, rafineriler, cam, çimento vb.) sahaları dahilindeki tüm kimya, fizik, kimya mühendisliği, malzeme ve metalürji mühendisliği, makina mühendisliği ve elektrik elektronik mühendisliğinden uzmanlar ve hatta sosyal bilimler ve iş güvenliği ana dallarındaki uzmanlar, üniversitelerin ilgili bölümleri ile enerji temelli sektörlerin biraraya gelip çalışmaları gerekmektedir.

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi işbirliği destekleri arttırılmalıdır.

İş modeli fizibilite çalışmalarında ilk odak olarak hedeflenen transport hub/ağır taşımacılık uygulamaları gibi modeller ile başlanarak, üretim, depolama ve taşıma önceliğindeki teknoloji gelişimleri tetiklenmelidir. Hedeflenen hidrojen değer zincirine ulaşma aşamasında, dünya standartları gereği belirlenen yol haritaları takibi ile üretim maliyetlerini azaltarak optimum CAPEX/OPEX koşulları sağlanmalıdır. Takip eden teknoloji seviyesinde sıvı hidrojen depolama ve taşıma teknikleri ilerletilmesi ile karbon emisyonunu azaltması yüksek efor isteyen sanayi kollarına yönlendirilmesi gerekmektedir.

Hidrojen vadileri, temiz hidrojen taşımacılığı için anlamlı bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple yenilenebilir enerji yatırımlarını ve bunların sürdürülebilir kaynaklar olarak devamlılığını sağlamada endüstriyel anlamdaki yeşil hidrojen entegrasyon modelleri oldukça önemlidir.

İş modeli devamında eş bazda üretilen hidrojen için canlı pazar hedefleri belirlenerek ilerlemelidir. Bu anlamda gerekli iş birlikleri hem Ar-Ge fon teşvikleri ile hem de sanayinin öz kaynakları ile desteklenerek, pazardaki sinerjinin sağlanması hedeflenmelidir. Gerekli risk değerlendirmeleri yol haritalarında oluşturulmalı, proje içlerinde bu risklere karşı önlem analizleri/kaydırmalar riski minimize etmek için önden belirlenmelidir.

Uzmanlaşmak için gerekli sürenin projelerde belirlenmesi ve gereken tüm desteklerden (PDA vb) faydanılması için proje içi zaman takvimlerinde yer verilmesi gereklidir.

Vadi projelerinin büyük yatırım maliyetleri sebebi ile özellikle başlangıç adımlarını atan projeler için yararlanabilecek tüm devlet ve özel fon desteklerinin paralel değerlendirilebilmesi ve teşvik mekanizmalarının arttırılması gerekmektedir. Bölgeden genele giden bir yayılma iş modeli benimsenerek hem finansal bütünlük hem de devlet, ülke regülasyon politikalarına uyum oldukça önemlidir.

Vadi projeleri için belirlenen üretim kapasitesi, coğrafi konumu ve değer zincirindeki sektörel çeşitliliğe göre zamansal/finansal değişiklikler olabileceği göz önünde bulundurularak,

*ortalama Ar-Ge süreleri: orta vadede 3-5 yıl arası olarak,

*zincirdeki pazar payının büyümesi, aktif vadi üretiminin kar amaçlı aksiyonlara geçişi ve deneyimli iş gücünün sürdürülebilir konuma gelmesi: uzun vadeli 5 yıldan fazla olarak düşünülebilir.

Ayırılması gereken toplam bütçenin, incelenen aktif vadi proje örneklerine, bölgesel durumdaki gerekli alt yapı ihtiyacına, verimli üretim/taşıma/depolama/uygulama için gerekli teknoloji ve Ar-Ge çalışma ihtiyaçlarına göre değerlendirildiğinde 5-20 MW aralıklarındaki vadi başlangıç kapasiteleri için 30 ile 100 milyon Avro arasında bir yatırım gerektirecektir.

Kritik Ürün/Teknoloji 6.2.

6.2. Fotokatalitik proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 6.2.

6.2. Fotokatalitik proseslerinin iyileştirilmesiyle yeşil hidrojen üretim teknolojilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Suyun fotokatalitik olarak ayrıştırılması yöntemi, yenilenebilir kaynakların (su ve güneş enerjisi) kullanılması açısından hem çevreye dost bir proses hem de yeşil hidrojen üretimi için üzerinde AR-GE çalışmaları yapılan konuların başında gelmektedir.

Fotoliz, kimyasal bir bileşimin fotonlar tarafından parçalandığı bir reaksiyon türü olup; özellikle sudan hidrojen üretmek için de kullanılabilir. Ancak, fotolizde fotonun sahip olduğu enerji kritiktir ve güneş spektrumunun geniş bir bölümü suyun ışıkla fotolizi için kullanılamamaktadır. Bu nedenle fotoliz reaksiyonlarının hızlanmasını sağlamak için fotokatalizör kullanımı gereklidir. Son yıllarda suyun fotokatalitik olarak hidrojen ve oksijene parçalanması proseslerinde kullanılacak yarıiletken özelliğe sahip pek çok fotokatalizör geliştirilmiş ve çok geniş bir fotokatalizör kütüphanesi oluşturulmuştur. Suyun fotokatalitik prosesler ile ayrıştırılma proseslerinde ışık spektrumunun çok geniş bir bölgesini soğurarak fotokatalitik reaksiyonları gerçekleştiren fotokatalizörlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde, çok fazla sayıdaki fotokatalizörlerin verimliliği artırmak amacıyla nikel, altın, stronsiyum gibi farklı metallerle ve B, N, S, ve O gibi farklı heteroatomlarla yüklenmesi/katkılandırılması ile fotoaktivitelerde önemli artışlar rapor edilmiştir. Bu kapsamda farklı üretim teknikleri, katkılandırma ve yükleme prosesleri ve reaksiyon sisteminin optimizasyonu üzerine çalışmalar yapılarak fotokatalitik aktivitenin artırılması ve dolayısıyla hidrojen üretim veriminin artırılması çalışmaları artan bir hızla yürütülmektedir. Suyun fotokatalitik olarak ayrıştırılması reaksiyonları, fotokatalizörlerin doğrudan sulu çözeltilerde kullanılması ile veya bu fotokatalizörler ile geliştirilen fotoelektrotların yer aldığı fotoelektrokimyasal proseslerde gerçekleştirilmektedir. Bu proseslerde kullanılacak ideal bir fotokatalizörün yüksek kararlılık, ışık spektrumunun geniş bir bölgesini absorplayabilme, ucuzluk, kolay sentezlenebilme, toksik olmama, geniş yüzey alanına sahip olmak, vb. kriterleri karşılaması gereklidir.

Suyun fotokatalitik olarak ayrıştırılması prosesi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde çok fazla sayıda katalizörün geliştirildiği ve test edildiği görülmektedir. Ancak son yıllarda yoğun bir şekilde AR-GE çalışmaları yürütülen bu proseslerin henüz teknolojik kullanılabilirliği için gerekli olan kriterleri karşılayamadığı görülmektedir. Ayrıca sözkonusu proseslerin sanayi ölçeğinde

kullanımına uygun fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal reaktörlerin gelişimine ihtiyaç vardır. Fotoelektroliz olarak isimlendirilen fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal hidrojen üretim sistemleri için farklı reaktör tasarımları önerilmektedir. PV panellerine benzer şekilde tasarlanan fotoelektroliz reaktörlerinde yarıiletkenlerden oluşturulan fotoelektrotların kullanıldığı elektrokimyasal hücrelerden oluşan paneller veya fotokatalizör partiküllerin toz olarak dağıldığı fotokatalitik reaktör sistemleri kullanılabilir. Fotoelektroliz reaktörleri filmlerden veya tüplerden oluşan paneller şeklinde tasarlanmaktadır.

Yapılan AR-GE çalışmaları ile elde edilen fotokatalizörler ile henüz ticarileşebilme kriterlerini sağlayacak verimlilikte hidrojen üretilmemektedir. Bu sebeple ideal bir fotokatalizörün sahip olduğu özelliklere sahip ve yüksek güneş-hidrojen (STH: solar to hydrogen efficiency) verimi ile çalışan (STH verimi >10%) yeni fotokatalizörlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Dünyada ve Türkiyede geliştirilen fotokatalizör sentez prosesleri hala laboratuvar ölçekli ve az miktarda fotokatalizör hazırlama üzerindedir. Bu sebeple sanayide hidrojen üretiminde kullanılacak şekilde fotokatalizör sentez proseslerinin ölçek büyütme çalışmalarına ihtiyaç vardır. Ayrıca fotoelektrot hazırlama çalışmaları da benzer şekilde büyük ölçekte üretim yapılabilecek şekilde geliştirilmesine ihtiyaç duymaktadır.

Günümüzde sadece laboratuvar ölçekli kullanılan fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal hidrojen üretim reaktörleri içinde sanayide hidrojen üretiminde kullanılacak şekilde ölçek büyütme ve tasarım çalışmaları gereklidir. AR-GE amaçla üzerinde çalışılan panel tipi reaktörlerin ölçek tasarımı ve ölçek büyütme çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Suyun fotokatalitik veya fotoelektrokimyasal proseslerle üretimi çalışmaları laboratuvar ölçekli fotoreaktörler ve fotoelektrokimyasal hücreler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu sistemler sadece AR-GE amaçlı çalışmalar için kullanılabilir. AR-GE amaçlı çalışmalarda laboratuvar ölçekli fotokatalizörlerin geliştirilmesi ve laboratuvar ölçekli reaktörlerde proseslerin gerçekleştirilme çalışmaları yürütülmektedir.

Suyun fotokatalitik olarak ayrıştırılması prosesi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde çok fazla sayıda katalizörün geliştirildiği ve test edildiği görülmektedir. Ancak son yıllarda yoğun bir şekilde AR-GE çalışmaları yürütülen bu proseslerin henüz teknolojik kullanılabilirliği için gerekli olan kriterleri karşılayamadığı görülmektedir. Ayrıca sözkonusu proseslerin sanayi ölçeğinde kullanımına uygun fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal reaktörlerin gelişimine ihtiyaç vardır.

Yapılan AR-GE çalışmaları ile elde edilen fotokatalizörler ile henüz ticarileşebilme kriterlerini sağlayacak verimlilikte hidrojen üretilmemektedir. Bu sebeple ideal bir fotokatalizörün sahip olduğu özelliklere sahip ve yüksek güneş-hidrojen (STH: solar to hydrogen efficiency) verimi ile çalışan (STH verimi >10%) yeni fotokatalizörlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Dünyada ve Türkiye’de geliştirilen fotokatalizör sentez prosesleri hala laboratuvar ölçekli ve az miktarda fotokatalizör hazırlama üzerindedir. Bu sebeple sanayide hidrojen üretiminde kullanılacak şekilde fotokatalizör sentez proseslerinin ölçek büyütme çalışmalarına ihtiyaç vardır. Ayrıca fotoelektrot hazırlama çalışmalarında benzer şekilde bulk üretim yapılabilecek şekilde geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde sadece laboratuvar ölçekli kullanılan fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal hidrojen üretim reaktörleri içinde sanayide hidrojen üretiminde kullanılacak şekilde ölçek büyütme ve tasarım çalışmaları gereklidir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyesi (THS)

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Suyun fotokatalitik olarak ayrıştırılması yönteminin, mevcut durumda katalizörlerinin pahalı, proses veriminin düşük olması vb nedenlerle teknoloji hazırlık seviyesi düşüktür. Ancak, bu alan laboratuvar ölçeğinde Ar-Ge aşamasında olup gelişmelere açıktır.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Dünyada fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal proseslerle sadece laboratuvar ölçeğinde çalışan reaktörler ve bu sistemlerde kullanılacak fotokatalizörlerin satışının gerçekleştiği örnekler mevcuttur. Örneğin Shilpent isimli bir firma farklı amaçlar için tasarlanmış laboratuvar ölçekli fotokatalitik reaktörleri tasarlayıp pazarlamaktadır. (<https://shilpent.com/other-products/84-photocatalytic-reactor.html>). Benzer fotoreaktörlerin üretimini ve pazarlamasını yapan diğer bir firma ise Çin menşeli techinstro firmasıdır (techinstro.com). Diğer bir örnekte fotokatalitik hidrojen üretimi dahil birçok fotokatalitik reaksiyonun gerçekleştirilebildiği Syzygy plasmonics firması tarafından geliştirilen laboratuvar ölçekli fotokatalitik reaktörlerdir. (<https://plasmonics.tech/photoreactor-technology>).

Ancak sanayi ölçeğinde fotokatalitik yöntemlerle hidrojen üretimi ile ilgili henüz ticarileşmiş bir örnek bulunmamaktadır. Dünyada THS: 3-5 düzeyindedir.

Ülkemizde bu konuda farklı üniversitelerdeki araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli fotokatalitik ve fotoelektrokimyasal hidrojen üretim çalışmaları yer almakta olup; THS 3-5 düzeyindedir.. Ancak ÜR-GE çalışmaları ile ilgili herhangi bir örneğe rastlanılmamıştır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için kimya, fizik, kimya mühendisliği, malzeme ve metalurji mühendisliği, makina mühendisliği ve elektrik elektronik mühendisliğinden uzmanlar bir arada çalışmalıdır.

Üniversitelerin ilgili bölümleri ile enerji temelli sektörlerin biraraya gelip çalışmaları gerekmektedir.

Ülkemizdeki enerji alanında AR-GE ve ÜR-GE yapan firmalar (ASPILSAN, SOCAR, TÜPRAŞ gibi), araştırma geliştirme enstitüleri ve TÜBİTAK MAM gibi araştırma merkezleri

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi iş birliği destekleri artırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi iş birliği önem arz edecektir. Uluslararası iş birlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Destek mekanizması :Ayrı yürüyen projeler, büyük bir platform bünyesinde eş güdüm içinde yapılacak projeler vb.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

6.2.a. Fotokatalitik hidrojen üretimde gerekli olan reaktör ve proseslerin geliştirilmesi

Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl; Kısa ve orta vadede

Ayırılması gereken tahmini bütçe:10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamu teşviklerinin sağlanması ve sanayi içerisindeki iş birliklerinin artırılmasına yönelik birleştirici rolü üstlenmesi. Kamunun gerekli destekleri (sübvansiyon ve vergi muafiyeti gibi) sağlayıp özel sektör için cazip hale getirmesi.

Sanayi iş birliğindeki Ar-Ge çalışmaları ve destek süreci sadece yeşil hidrojen üretim proseslerini geliştirme alanında değil, tüm değer zincirinin yaratılıp Türkiye geneline yayılmasında rol oynamayı hedeflemelidir. Yeşil hidrojen üretim teknolojilerindeki fiziksel ve kimyasal süreç iyileştirmelerinin uygulama alanları yaratılarak farklı birçok sektör oyuncusunu hem mali hem de teknolojik açıdan bir araya getirmek kritik bir önem arz etmektedir. Dünyada başarılı uygulamalarına rastlanan yeşil hidrojen vadileri, hub'ları ve değer zinciri yaratma girişimleri takip edilerek, Türkiye'de bir benzerini oluşturma girişimleri gerek Ar-Ge projeleri ile gerekse akademik çalışmalar ile desteklenmelidir. Tüm sektörlerin ortak paydada buluşması, yeşil hidrojen özelindeki ticari arz/talep dengesinin saptanarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Ülkemiz için olgunlaşmış alt yapı hazırlığının otuz yılı aştığı DG baz alındığında, yeşil hidrojen

için hem üretimde hem de pazar içerisinde yer edinilmede daha hızlı ve sağlam adımlarla ilerlenmesi gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Hidrojen yol haritasının oluşturulması. Hidrojen üretimi ve kullanımı konularında teşvik edici mevzuatlar oluşturulmalıdır. Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterli değildir. Kısa ve orta vadede üretim, test ve sertifikasyon altyapıları oluşturulmalıdır. Örneğin TÜBİTAK önderliğinde makul ücretler karşılığında sertifikasyon ve test hizmetlerinin sunulması gerekmektedir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde yeterli düzeyde yetkinlikte AR-GE insan kaynağı mevcuttur. ÜR-GE için insan kaynağı desteklerine ihtiyaç vardır.

Teşvik ve süspansiyon seçenekleri devreye sokulmalıdır.

Destek ve Teşvikler

Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir. Oluşturulacak teşvik ve destek mekanizmalarında endüstrideki paydaşların ve üniversitelerin iş birliği zorunlu kılınmalıdır. Böylelikle ülke çapında hidrojen teknolojileri üzerine tecrübenin hızlı ve kümülatif şekilde artırılması sağlanmalıdır. Ayrıca yetişmiş insan kaynağının artırılması için sanayinin ihtiyacını karşılayacak projelerin üniversitelere yaptırılması ve bu projelerin %100 desteklenmesi gerekmektedir. Bu sayede sanayi paydaşlarına ekonomik olarak yük bindirilmemesi ve sanayinin eforunun ürün odaklı olması amaçlanmalıdır.

Kritik Ürün/Teknoloji 6.3.

6.3.Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kraking sistemlerinin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 6.3.

6.3. Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Doğada çok fazla miktarda bulunan hidrojen, önemli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olması ve enerji taşıyıcı olarak büyük bir potansiyele sahip olmasından dolayı umut vadeden oldukça temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen depolama, sabit ve taşınabilir güç sistemleri ve ulaşım dahil olmak üzere farklı hidrojen ve yakıt hücresi teknolojilerinin gereksinim duyduğu süreçlerden biridir. Hidrojen, gravimetrik enerji yoğunluğu en yüksek olan enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Ancak, hidrojen doğada bulunan en hafif element olması nedeniyle hacimsel enerji yoğunluğu çok düşüktür ve depolamada büyük hacimler gerektirmektedir. Hidrojen depolarken nihai amaç, depolamada mümkün olan en yüksek hacimsel yoğunluğa ulaşmaktır. Bir diğer önemli hedef ise hidrojenin salınımı ve geri alınımının tersinir olmasıdır. Bu kriterleri sağlarken, depolamadaki maliyeti düşürmek, genel verimliliği arttırmak ve olumsuz çevresel etkileri azalmak gerekmektedir. Halihazırda mevcut hidrojen depolama sistemlerinden hiçbiri endüstri ve son kullanıcı tarafından istenilen tüm beklentileri karşılayamamaktadır. Bütün bu istenilen özellikleri en iyi şekilde sağlayabilmek için hidrojen depolama tekniklerinin geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Ancak ticari olarak temin edilebilen hidrojen depolama yöntemlerinin iyileştirilmesi ve Ar-Ge faaliyetlerine olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple daha yüksek enerji yoğunluğu potansiyeline sahip gelişmiş depolama yöntemlerinin ve malzemelerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [16].

Hidrojen depolama tekniklerini, gaz, sıvı ve katı fazda olmak üzere üç ana kategoriye ayırmak mümkündür. Hidrojen fiziksel olarak kısa vadede sıkıştırılmış gaz veya uzun vadede sıvı olarak depolanması en iyi depolama seçenekleri olarak bilinmektedir. Geleneksel olarak büyük ölçekli hidrojen genellikle 20 K'de ve 71 kg/m³ yoğunlukta sıvı halde depolanmaktadır. Ancak sıvılaştırma, hidrojenin depolayabileceği enerjinin %30'unun harcanması demektir. Bunun yanında hidrojen, 700 bar'a kadar yüksek basınçlı tanklarda sıkıştırılarak da depolanabilmektedir. Ancak sıkıştırma nedeniyle depolanan enerjisinin yaklaşık %12'si kadar enerji kaybına neden olur. Ancak her iki depolama yönteminde de hidrojenin yüksek difüzyon hızı nedeniyle istenmeyen hidrojen gazı salınımı riski vardır. Hidrojen kimyasal olarak bağlı olmadığı için kolayca dağılılabılır ve hidrojen depolama tesislerinde her zaman yangın ve patlama riski oluşturur [17]. Hidrojenin gaz veya sıvı olarak depolanmasına alternatif olarak

karbon alltropları ve Metal-Organik Çerçevesel (MOF'ler) gibi farklı adsorbentler yardımıyla, fiziksel depolama sistemleri ile metal hidrürler, kompleks metal hidrürler, borhidrürler (BH₄)⁻, alanatlar (AlH₄)⁻, nitrürler, amonyak-boran ve amido-boran gibi basit, karmaşık ikili ve üçlü bileşenler, siklopentan gibi sıvı organikler veya amonyak, metanol gibi kimyasallar olarak depolanması mümkündür. Çok farklı malzemelerin bu örnekleri, var olan teknolojiyi iyileştirme ve geliştirme açısından yeni hidrojen depolama çözümleri üretmek için büyük bir potansiyel içermektedir.

Tüm depolama sistemleri için hedef uygulama için gerekli hidrojeni yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunlukta ve uygun maliyette sürdürülebilir ve güvenli şekilde depolayabilecek sistemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde teknolojisi olgunlaşmış depolama sistemlerinde hidrojenin fiziksel olarak gaz formunda yüksek basınçlı tanklar (350–700 bar tank basıncı) kullanılarak veya kriyojenik sıcaklıklarda sıvı olarak depolanmaktadır. Hidrojenin fiziksel olarak yüksek basınçlı tanklarda depolanması teknolojisi gelişmiş en olgunlaşmış hidrojen depolama teknolojisidir. Özellikle araç üstü fiziksel hidrojen depolaması için mevcut ve yakın vadeli 350 ve 700 bar (5.000 ve 10.000 psi) nominal çalışma basınçlı sıkıştırılmış hidrojen gaz tankları kullanılmaktadır. Gaz fazda depolama tankın ağırlığına ve tipine göre ağırlıkça farklı yüzdelerde hidrojen depolanabilmektedir. Diğer yöntemler ile kıyaslandığında daha ekonomik bir depolama yöntemidir, fakat hidrojenin enerji yoğunluğunun oldukça düşük olması, depolanan kütlece hidrojen miktarının yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Üstelik kullanılan basınçlı kapların yeterince güvenli olması gerekir ve bilinen hidrojen depolayan kapların boş ağırlığının da fazla olduğu bilinmektedir. Bu sebeple hidrojeni gaz halde depolama sabit depolamalar için oldukça elverişli hale gelirken farklı depolamalar için yeni malzeme ve sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrojenin sıvı olarak depolanması, kriyojenik sıcaklıklar gerektirir (hidrojenin bir atmosfer basıncında kaynama noktası -252.8°C'dir). Normal kaynama noktası 20 K civarında olan düşük basınçlı sıvı hidrojen, büyük ölçekli hidrojen depolama ve nakliyesi için daha çok tercih edilmektedir. Yüksek basınçlı tanklarda sıkıştırılmış hidrojen normal sıcaklıklarında depolanırken, "soğuk" (ortam altı fakat 150 K'den büyük) ve "kriyojenik" (150 K ve altı) sıkıştırılmış hidrojen depolaması, daha yüksek hidrojen yoğunlukları nedeniyle üzerinde araştırmaların devam ettiği alanlardan biridir. Hidrojenin sıvı fazda depolanması, ısı transferini ve kaynama olayını minimize eden süper yalıtımlı olarak tasarlanmış çift cidarlı kriyojenik kaplarda yapılır. Gaz halde depolamaya göre nispeten hafif bir depolamadır, fakat bu depolama için kriyojenik sıcaklık gerektiğinden sıvılaştırma için enerji gerekmektedir. Özellikle büyük miktarlardaki depolamalar için maliyet oldukça yüksektir. Hidrojen enerjisinin yaklaşık %30'u sıvılaştırma işlemi için kullanılır. Bunun dışında, hidrojenin sahip olduğu düşük kritik sıcaklık yüzünden çok iyi yalıtılmış kapta oluşan ısı transferi, kap basıncının yükselmesine

neden olur ve basıncı dengelemek için buharlaşan hidrojenin atmosfere atılması gerekir. Bu durum, depolama ve kullanım sırasında buharlaşma kayıplarına neden olmaktadır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında sıvı fazda hidrojen depolama için var olan teknolojinin iyileştirilmesi ve yeni malzeme ve sistemlerin geliştirilmesi konularında Ar-Ge çalışmalarına hız verilmesi gerekmektedir.

Sıkıştırılmış hidrojen depolama sistemlerin ticari olarak yaygınlaşması ve hidrojenin yakıt olarak kullanımı için gerekli kriterler henüz karşılanamamış olsa da, gravimetrik yoğunluk, hacimsel yoğunluk ve maliyet dahil olmak üzere daha fazla alanda iyileştirme çalışmaları gerekmektedir. Yakın vadede, özellikle yakıt hücresi uygulamalarında yakıt hücresinin verimli çalışmasını sağlamak için yeterli miktarda hidrojen sağlayabilen, müşteri odaklı performans ölçütlerini güvenli, uygun maliyette ve sürdürülebilir şekilde karşılayabilecek depolama sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Depolama sistemlerinin hedeflenen metrikleri, kapasite (yani çalışma süresi), yeniden doldurma ve boşaltma kinetiği, dayanıklılık ve uygun koşullarda çalışabilirlik gibi uygulamanın çalışma gereksinimlerini karşılayabilmelidir. Hidrojen enerji sistemlerinin ticarileştirilmesinden önce hidrojen depolama sistemlerinin karşılaştığı maliyet, paketleme ve dayanıklılık gibi temel problemlerinin çözüme kavuşturulması gerekmektedir.

Hidrojen depolama seçenekleri değerlendirilirken, her uygulamanın kendine özgü zorlukları ve performans kriterleri olduğu için her uygulama için depolama sistemleri ayrı ayrı ele alınmalıdır. Örneğin, en zorlu uygulamalardan biri olan otomotiv sektörü için, ağırlık, hacim, çalıştırma şartları, yeniden doldurma hızı ve maliyet gibi önemli performans kriterini karşılayabilecek bir hidrojen depolama sistemi gerekmektedir. Otomotiv uygulamaları için kullanılan ve bu kriterlerin çoğunu karşılayabilen mevcut sıkıştırılmış hidrojen tanklarının önemli maliyet problemleri vardır.

Genel olarak sıkıştırılmış hidrojen depolama tankları; çelik, kompozit (özel alaşımlar) ile kaplanmış alüminyum veya kompozitle kaplanmış plastik malzemelerden imal edilmektedir. Uygulamaya bağlı olarak en yaygın kullanılan malzeme çeliktir. Bunun sebebi çeliğin ucuz ve yüksek mekanik özelliklerinin olmasıdır. Fakat bunun kütleli enerji yoğunluğuna negatif yönde etkisi bulunmaktadır ve fazla ağır olması sebebiyle sabit depolamalar için tercih edilmektedir. Son yıllarda hızla gelişen malzeme teknolojisi sayesinde taşıtlarda kullanılacak olan tanklar için, dış yapısı darbelere dayanıklı, çelik olanlara oranla oldukça hafif ve dayanıklı bir yapıya sahip olarak güçlendirilmiş karbon nanolifleri gibi çeşitli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Bu tankların maliyetini etkileyen en önemli bileşen karbon fiber kompozit malzemelerdir. Mevcut fiziksel depolama AR-GE çalışmaları, basınçlı tankın fiber takviyeli kompozit kısmının

maliyetini düşürmeye odaklanmaktadır. Sıkıştırılmış tankların maliyetini azaltmak için potansiyel yolların başında karbon fiber kompozitlerin maliyetinin düşürülmesi ve/veya daha düşük maliyetli alternatif fiber takviyeli kompozitler geliştirilmesi, tanka dahil edilen fiber takviye miktarının optimizasyonu ve dolayısıyla azaltılması çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir. Ayrıca hidrojen depolama sistemleri için yeni hidrojen depolama malzemelerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Hidrojenin kullanım alanına göre farklı depolama sistemlerinin geliştirilmesi ve bu sistemlere ait farklı performans beklentilerinin karşılanması gerekmektedir. Örneğin otomotiv hidrojen depolama sistemleri için ulaşılması gereken ideal bir yüksek basınçlı tank için 2,2 (0,065) kWh/kg sistem (kg H₂/kg sistem) gravimetric yoğunluk, 1,7 kWh/L sistem (kg H₂/L sistem) hacimsel yoğunluk ve \$8 (\$266) \$/kWh (\$/kg H₂) maliyete ulaşılması hedeflenmektedir. Özellikle otomobiller için 500 km'lik bir sürüş menziline karşılamak için 5-13 kg arası hidrojen depolama kapasitesine sahip tankların geliştirilmesi gerekmektedir. (<https://www.energy.gov>).

FreedomCAR 2015 system tarafından ulaşım sisteminde kullanılacak hidrojen depolama sistemlerinin şu kriterleri karşılaması beklenmektedir: yüksek depolama kapasitesi (3 kWh/kg veya ağırlık %9 hidrojen ve 2,7 kWh/ L ve 0,081 (kg H₂)/L sistem), hızlı kinetik (0,02 (g H₂)/s.kW), yüksek tersinirlik (1500 döngü), uygun çalışma sıcaklığı (-40 ile 60 °C arası), düşük maliyet (2\$/kWh veya 67\$/kg H₂), yüksek saflık (<1 ppm CO) ve yüksek güvenlik.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

Hidrojenin gaz veya sıvı olarak depolanmasına alternatif olarak farklı adsorban ve adsorbanlar yardımıyla hidrojenin depolanması mümkündür. Fiziksel adsorpsiyon ile hidrojen depolandığı zaman adsorplanan hidrojen gazı kolaylıkla ve geri dönüşümlü olarak ayrılabilir. Bu yöntemdeki fiziksel adsorpsiyon işlemi, adsorbanın moleküler kohezyon kuvvetlerine benzer şekilde nispeten zayıf van der Waals etkileşimi olduğu dipol moment, polarizasyon kuvvetleri veya dağıtıcı kuvvetler gibi kuvvetler ile gerçekleşmektedir. Bu sistemlerin en önemli avantajı hidrojen difüzyon riskinin oldukça düşük olmasıdır. Ancak bu sistemlerin kütlece içerdiği hidrojen oranının düşük olması ve hidrojen alım ve salma hızının düşük olması bu sistemlerin önemli dezavantajları olarak görülmektedir. Hidrojen depolamada adsorban kullanmanın diğer bir avantajı, dihidrojenin minimum aktivasyon enerjisi ile adsorpsiyon/desorpsiyon döngüsü boyunca moleküler olarak depolanabilmesidir. Ancak sorbentlerin kullanımında kimyasal hidrojen ile bağ oluşumu veya metal hidritlerde gaz-katı etkileşimlerinin tipik özelliği olan

nispeten zayıf adsorpsiyon entalpileri bu sistemlerin en önemli dezavantajı olarak gösterilmektedir.

Fiziksel adsorpsiyon için kullanılacak olan malzemelerin özgül yüzey alanı yüksek olmalıdır. Bu nedenle, son yıllarda üzerinde çalışılan sorbentlerin başında koordinasyon polimerleri, farklı karbon allotropları (aktif karbon, karbon nanotüpler vb.) ve çok yüksek yüzey alanına sahip Metal Organik Çerçevesel (Metal Organic Framework; MOF)'ler, alümina, silika, zeolitler ve benzeri maddeler gelmektedir. Bu ve benzeri yüksek yüzey alanlı malzemelerle yapılan hidrojen depolama ölçümleri fiziksel adsorpsiyonun hepsi için geri dönüşümlü olduğunu göstermiştir. Adsorben malzemenin geometrisine bağlı olarak farklı adsorpsiyon mekanizmaları mevcuttur. Yüzeyin açık olması ya da gözeneklerin 2 nm'den küçük (mikro gözenek) olması halinde çok tabakalı adsorpsiyon gerçekleşirken 2nm'den büyük 50 nm'den küçük gözeneklerde (mezo gözenek) kapiler kondenzasyon gerçekleşir. 50 nm'den daha büyük gözeneklerde (makro gözenekler) ise adsorpsiyon tıpkı açık yüzeyde adsorpsiyon gibi gerçekleşir. Dolayısıyla gravimetrik adsorpsiyon, yüzey alanı ile yüksek oranda ilişkili olduğundan, yüksek bir mikro gözenek hacmine sahip yeni adsorbanların tasarımı ve geliştirilmesi üzerinde çalışılan konuların başında gelmektedir.

Metal-Organik Çerçevesel veya farklı karbon allotropları gibi farklı adsorbanların üzerinde fiziksel adsorpsiyon yoluyla hidrojen adsorpsiyonunun, sıvılaştırılmış depolama ve kriyo-sıkıştırılmış depolama gibi diğer faz dönüştürme işlemlerine kıyasla daha uygun ve kararlı olduğu gösterilmiştir. Adsorban olarak gözenekli yapılarında çok büyük miktarda gaz molekülünü tutma potansiyeline sahip geniş bir yüzey alanına sahip yüksek gözenekli yapılar tercih edilmektedirler. Isı veya basınç eklenmesiyle, adsorbanların gözeneklerinde van der Waals kuvveti yoluyla adsorbe edilen hidrojen hızla desorbe edilebilir. İyi bir adsorban için, ortam sıcaklığında ve basınç koşullarında moleküler hidrojenin adsorbsiyon/desorpsiyon süreçlerini hızlı ve tersinir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Hidrojen depolama sistemlerindeki kütle transferi, yüzey kimyası ve katı-katı ara yüzlerdeki işlemler dahil olmak üzere depolama malzemelerinin termodinamik ve kinetik sınırlamalarının hidrojenin depolanma proseslerinin performanslarını etkileyen temel faktörler olduğu bilinmektedir. Özellikle ulaşım, sabit ve taşınabilir güç sistemleri için uygun hidrojen depolama teknolojileri geliştirilmesi ve bu sistemlerin maliyetinin azaltılarak toplam hidrojen enerji sistemindeki depolama proseslerinin maliyet payının azaltılmasına ihtiyaç vardır. Bu bağlamda özellikle yeni hidrojen adsorbantların ve tank üretiminde kullanılacak fiber malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Taşınabilir güç uygulamaları için yeniden şarj edilebilir bir hidrojen depolama sisteminin en az 1,0 kWh/kg sistem (ağırlıkça %3,0 hidrojen) ve 1,3 kWh/L sistem (0,040 kg hidrojen/L) maliyet ile geliştirilmesi hedefine ulaşılabilmesi önemli bir hedef olarak görülmektedir. Otomotiv sektörü için araçta hidrojen depolaması sistemlerinde 2,5 kWh/kg

sistem (ağırlıkça %7,5 hidrojen) ve 2,3 kWh/L (0,070 kg hidrojen /L) sistem performansına sahip depolama sistemlerinin 8\$/kWh (266\$/kg H₂ depolanmış) maliyetle geliştirilebilmesi gerekmektedir [1].

Gözenekli malzemelerin hidrojen depolama kapasitesini belirleyen en önemli parametreler yüzey alanı, gözenek hacmi, gözenek boyutu ve adsorpsiyon entalpisidir. Oldukça yüksek gözenek yapısına sahip aktif karbon malzemesi hidrojeni mikro gözenekleri arasında depolanmaktadır. Fakat bu gözeneklerde depolama için yüksek basınç gereklidir. Diğer taraftan karbon nano tüpler (KNT) gelişen teknoloji ve farklı sentezleme yöntemleri ile tek duvarlı ve çok duvarlı olacak şekilde iki ana türde elde edilmektedir. Karbon nanotüplerin hidrojen depolama kapasiteleri nanotüpün cinsine, tüplerin kapalı veya açık olmasına, ölçülerine (tüp çapı ve uzunluğu v.b) ve tüp yüzeylerinin aktifliğine göre farklılık göstermektedir. KNT'ler hidrojen moleküllerinin metal-KNT hibritlerine bağlanmasını arttırmak için geçiş metalleri veya alkali metaller ile modifiye edilmektedir. Lityum (Li) ve potasyum (K) katkılı çok duvarlı karbon nanotüpler ile hidrojen depolama kapasiteleri arttırılmıştır. Li katkılı karbon nanotüpler, K katkılı karbon nanotüplere kıyasla kimyasal olarak daha karalıdır. Ancak bu yapılardan hidrojenin geri salınımı için 473 ile 673 K aralığında bir sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır.

Bazı katkılı MOF'lar, hidrojen depolayıcısı olarak taşınabilir uygulamalar için umut vaat etmektedir. Ancak diğer hidrojen depolama sistemlerinde olduğu gibi MOF'larında belirli dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki MOF'ların moleküler formdaki hidrojen ile zayıf etkileşimleridir. Başka bir problem ise MOF'ların dış etkenlere bağlı olarak, muhafaza edilebilmesi, ayrışma ve parçalanmaya meyilli yapılarının olmasıdır. MOF'larda hidrojen depolanması DOE'nin kriterleri göz önüne alındığında yetersiz kalmaktadır [18]. Bu nedenlerle MOF'larda oda sıcaklığı ve uygulanabilir basınçta yüksek H₂ depolama kapasitesine tekrarlanabilir sonuçlarla ulaşmak için yüzey alanı ile gözenek boyutu arasındaki ilişki için optimum gözenek boyutu çalışmaları gerekmektedir. Sonuç olarak bu fiziksel adsorpsiyon malzemeleri üzerinde hidrojenin metal kümelenmesi, düşük saflık, geri salınım sıcaklığı ve kararlı yapı davranışlarındaki belirsizliklerin giderilmesi gerekmektedir.

Fiziksel hidrojen depolama sistemleri (örneğin, yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz tankları ve kriyojenik sıvı tankları) günümüz teknolojisinde hidrojenle çalışan araçlarda kullanılan en olgun teknoloji olarak görülmektedir. Araç platformlarında yaygın kullanımının sağlanabilmesi için, sıkıştırılmış gaz sistemlerinin maliyetinin ana bileşimi olan basınçlı tankların karbon fiber kompozit kısmının performansının iyileştirilerek maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Ayrıca, performans gereksinimlerini karşılamak için malzeme bazlı depolama yaklaşımları için uygun maliyetli basınçlı kaplar ve kriyojenik tank tasarımları gerekmektedir. Maliyet düşürülmesi yanında hidrojen gazının basınçlandırılması için yüksek enerji gereksiniminin minimuma

indirilmesi, sızdırmazlık sağlanması için yüksek kalitede tank malzemesi kullanımı, hidrojenin kompozit malzemelerin içine nüfuz etme olasılığının elimine edilmesi konularında çalışmaların artırılması gerekmektedir. Bu nedenle, fiziksel depolama AR-GE'sini geliştirme çabaları, özellikle malzeme geliştirme ve sistem tasarımı iyileştirilmesine ihtiyaç vardır.

Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin iyileştirilebilmesi için, kullanılacak yeni sorbent malzeme geliştirilmesi, dihidrojen bağlama enerjilerini artırarak etkin adsorpsiyon performansının iyileştirilmesi ve sorbent malzemelerin gözenek boyutunu optimize ederek, gözenek hacmini ve yüzey alanını artırarak bu sistemlerin hacimsel ve gravimetrik depolama kapasitelerinin iyileştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesi gereklidir. Tüm bu iyileştirmelerle hidrojen depolama performansını iyileştirerek düşük maliyette yüksek basınçlı hidrojen depolama sistemleri geliştirilmesi gerekmektedir.

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

Hidrojen depolamada ilgi gören diğer bir yöntemde hidrojeni kovalent bağ ile bağlayarak depolayan malzemeler ile hidrojeni katı veya sıvı olarak depolayabilen kimyasal hidrojen depolama sistemleridir (Amonyak, metanol, metal hidrürler gibi). Kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin hidrojenlenmesi ve hidrojen salınımı proseslerinin tersinirliği, ısı gereksinimleri ve bu malzemelerin yeniden kullanılabilirliği bu sistemlerin performansını belirleyen en önemli parametrelerdir.

Hidrojen, oldukça reaktif bir element olması sebebi ile katılarda fiziksel ve kimyasal olarak adsorplanarak hidrojen atomları ile depolama malzemesi arasında kimyasal bağ oluşturarak depolanabilir. Hidrojen birçok metal, metaller arası bileşik ve alaşım ile birleşerek hidrürleri oluşturabilmektedir. Kısaca, metal hidrür oluşumu, hidrojen moleküllerinin metal yüzeyine yaklaşması, burada kimyasal reaksiyonla hidrojen atomlarına ayrışması ve daha sonra hidrojen atomlarının metalin kristal kafes içine göç etmesi ile açıklanabilir. Hidrojen depolamada kullanılacak olan metalin seçiminde önemli kriterlere bakılması gerekir. Bunlar; hidrojen depolama kapasitesi, şarj-deşarj kinetiği, aktivasyon kolaylığı, çevrim sayısı, reaksiyon sıcaklığı gibi performans özelliklerinin yanı sıra maliyet ve güvenlidir. Metal hidrürün; hidrojen emilim ve geri salınım sıcaklıklarının düşük, hidrojen depolama kapasitesinin yüksek, reaksiyon kinetiğinin hızlı, çevrimsel kararlılığının yüksek, oksijene karşı kararlılığının yüksek, işlem sonrası hacimsel genişlemenin düşük, atık miktarının az ve maliyetinin düşük olması gerekmektedir.

Metal hidrürler (MH_x) [19] özellikle katı hallerinden dolayı hidrojen depolama malzemeleri geliştirme çalışmalarında ilgi çeken ve gelecek vadeden depolama sistemlerinin başında gelmektedir. Hidrojen depolamada en çok kullanılan metaller magnezyum, demir, nikel, titanyum ve manganezdır. Metal hidrür oluşumu yani hidrojenin depolanması ekzotermik bir reaksiyon iken hidrojenin salınımı endotermik bir reaksiyondur yani uygun koşullar sağlanırsa depolanmış hidrojen tekrar yapıdan dışarı salınabilir. Öte taraftan hidrojenin metal yüzeyinde ayrışması kullanılan metalin saflığı, morfolojisi ve yüzey yapısı gibi bazı etmelere bağlıdır. Metal türüne bağlı olarak farklı sıcaklık ve basınçlarda depolamanın gerçekleştirildiği hidrürler bulunmaktadır.

Metal hidrürler üzerinde en çok çalışılan konular genel olarak metaller arası bileşikler, kimyasal hidrürler ve Mg-bazlı alaşımlar ve kompleks hidrürlerdir. Metaller arası bileşikler genel olarak AB_5 , AB_2 , AB ve A_2B formundadır ve sırasıyla bu bileşiklerde hidrojen depolama kapasiteleri sırasıyla %1,5; %2,0; %1,8 ve %3,0 tür [20]. Metaller arası bileşikler yani iki elementin bileşiminden oluşan metal hidrür prototipinde, A elementi genellikle nadir toprak ya da alkali toprak metali olup kararlı hidrür oluşturma eğilimindedir. B elementi ise genellikle geçiş metali olup sadece kararsız hidrür oluşturur. Ancak son yıllarda metaller arası bileşiklerin düşük gravimetrik hidrojen depolama dezavantajından dolayı kompleks hidrürler üzerine çalışmalar önem kazanmıştır. Kompleks hidrürlere örnek olarak alanatlar, borhidrürler ve nitrürler verilebilir.

Metal hidrürleri metal-hidrojen bağının niteliğine ve sıcaklığına bağlı olarak iki temel sınıfa ayırmak mümkündür. Basit ikili metal hidrürler metal-hidrojen bağının niteliğine göre iyonik, kovalent ve metalik hidrürler olmak üzere üç temel gruba ayrılırken ikinci durumda ise, yüksek sıcaklık (MgH_2 gibi) [21] ve düşük sıcaklık ($LaNi_5H_6$ gibi) metal hidrürler olarak sınıflandırmak mümkündür. $NaAlH_4$, Na_3AlH_6 gibi üçlü hidrür yapılarında ise, hidrojen Al ile kovalent olarak bağlanarak, $[AlH_4]^-$, $[AlH_6]^{3-}$ kompleks anyonlarını oluşturur. Bu anyonlar ise Na^+ gibi katyonlarla iyonik bağ yaparlar. Bu tür yapılar kompleks hidrür olarak tanımlanır.

Kompleks hidrürler arasında özellikle, alanatlar $[AlH_4]^-$ [22] ve borhidrürler $[BH_4]^-$ [23] düşük ağırlıkları ve iyi hidrojen depolama kapasiteleri nedeniyle dikkat görmektedir. Alkali metal ve toprak alkali metal bazlı kompleks alüminyum hidrürler ($MAlH_4$, $M=Na, Li, K$) ılımlı sıcaklık ve basınçta iyi bir hidrojen depolama adaydırlar ve teorik olarak hidrojen depolama kapasiteleri %13,5'a (ağ.) [20] ulaşmaktadır. Geleneksel metal hidrürler ile kompleks hidrürler arasındaki temel fark, kompleks hidrürlerde $MAlH_4$ 'ler kimyasal ayrışma (iyonik veya kovalent bileşiklere dönüşmesi) ile salınım yaparlar ve proses hidrürlerin erimesiyle başlayıp ardından tri-alkali metal ara ürünü (M_3AlH_6) oluşumunu takip ederler.

Ağır alkali metal-bazlı kompleks hidrürlerin gravimetrik hidrojen depolama yoğunluklarının düşük olması nedeni ile 2 tür hafif alkali metal türevleri; sodyum alanatlar ve lityum alanatlar hidrojen depolama kapasitelerinin %4-7 (ağ.) olmaları ve düşük sıcaklıkta hidrojeni geri salmaları sebebiyle yüksek teknoloji geliştirme anlamında büyük ilgi çekmektedir. Ancak, kompleks hidrürlerin hidrojen depolamada kullanımları kinetik ve termodinamik sınırlamaları olmaları sebebiyle bu konudaki çalışmaların hız kazanması gerekmektedir.

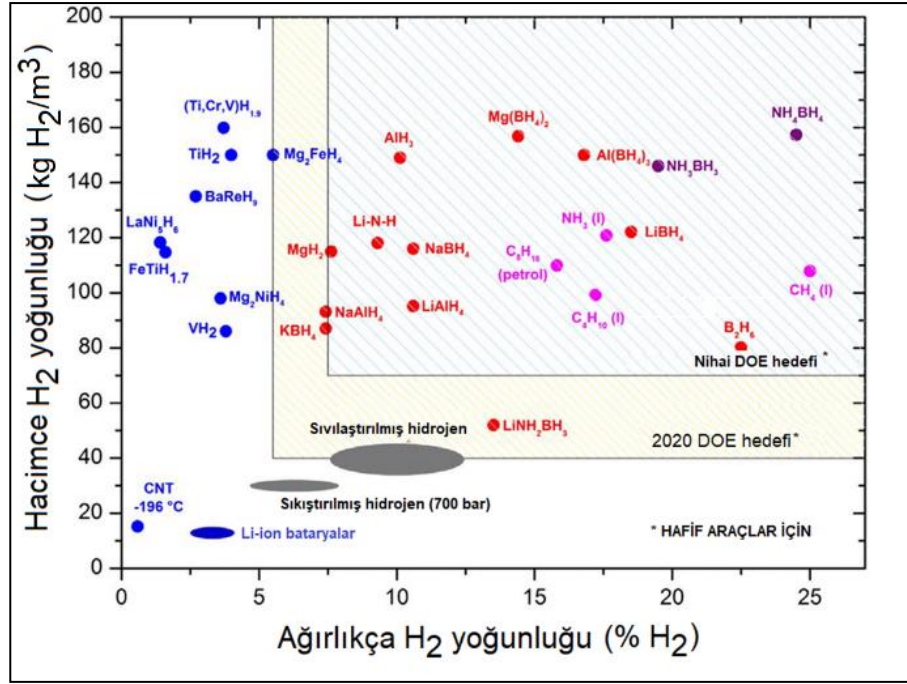
Sodyum alanatlar, alüminyum ve sodyumun kompleks hidrürleridir. Hidrojen depolamaya uygun bir malzemeler olmalarına rağmen hidrojenin serbest hale geçmesi çok yavaş gerçekleşmektedir. Bununla beraber, kompleks alüminyum hidrürler tersinmez özellikte olmaları sebebiyle pratik uygulamalardaki kullanımları sınırlıdır. Teorik olarak NaAlH_4 ve Na_3AlH_6 , sırasıyla % 3,7 (ağ.) ve % 1,85 (ağ.) hidrojen depolayabilmektedirler. Bu malzemelerde geçiş ya da nadir bulunan metallerin katalizör olarak kullanılmasıyla kompleks hidrürler belirli bir dereceye kadar dönüşümlü hale gelebilmektedir.

Lityum alüminyum hidrürleri, LiAlH_4 kararsız hidrit halinde kolayca bozulmaktadır, fakat yeniden hidrojene olamamaktadır. Bunun yanında lityum alüminyum hidrürler kinetikleri düşük ve yüksek sıcaklıklarda absorbe/desorbe olmaları gibi bazı sınırlamalara da sahiptirler. Ancak bazı çalışmalarda nano metal ilavesi ile LiAlH_4 'ün bozunma kinetiği incelenmiştir. Ayrıca bilyalı öğütmenin desorpsiyon reaksiyonuna etkisi üzerinde çalışmalarda yapılmıştır. Yine bazı geçiş metalleri ile yapılan katkılımlarla LiAlH_4 'ün bozunma sıcaklığı düşürülebilmesi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ancak, bu konudaki çalışmalarda maksimum performansı sağlayabilmek için farklı malzeme ve yöntemlerle bu konudaki dezavantajların olabildiğince elimine edilmesi gerekmektedir.

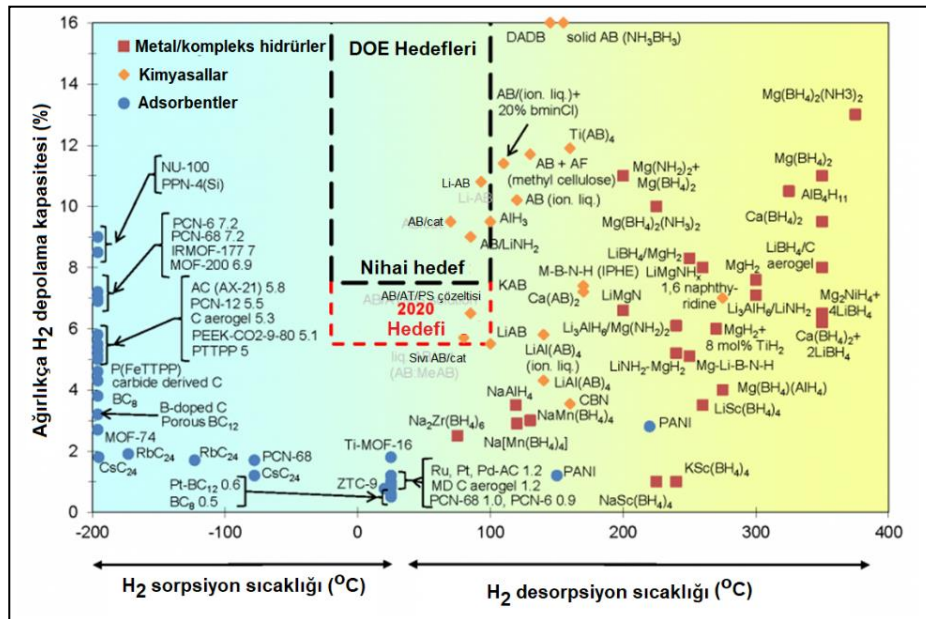
Kompleks hidrürlerin alt grubunda yer alan borhidrürlerde genellikle IA ve IIA grubu metallere uygulanmaktadır. Bununla beraber, farklı borhidrürlerde $(\text{M}(\text{BH}_4)_n)$, M ile simgelenen metal Li, Na, K ve Mg olabilmektedir ve bağ yapılarına bağlı olarak n değeri 1-4 arasında değişmektedir. Tetrahidroboratlar olarak da bilinen metal borhidrürlerde; hidrojen kovalent olarak merkez atoma bağlanmıştır ve güvenli bir şekilde su içerisinde çözünebilmeleri stabiliteleri ile ilişkilidir. Yüksek gravimetrik ve volumetrik hidrojen depolama kapasitelerine sahiptirler. Yüksek gravimetrik hidrojen depolama yoğunluğundan dolayı alkali geçiş metal borhidrürlere (MBH_4) ilgi artmaktadır ve bunlar arasında LiB_4 , NaBH_4 , $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ ve $\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$ yüksek gravimetrik ve hacimsel hidrojen depolama yoğunluğundan dolayı önemli bir yere sahiptir. Ancak bu bor hidrürler yüksek termodinamik kararlılığa sahip olmaları ve bu borhidrürlerden oluşan istenmeyen uçucu yan ürün olan boran sebebi ile yavaş kinetiğe sahiptirler. Ancak bu termodinamik ve kinetik özellikler farklı malzemelerin katkılanması ile artırabilir.

Şekil 1'de kompleks hidrürlerin ve bazı diğer hidrür yapılarının hidrojen taşıma kapasiteleri ve ABD Enerji Bakanlığı hedefleri verilmektedir. Bununla birlikte zayıf termodinamik ve kinetik

özellikler, yalnızca yüksek sıcaklık ve basınçlarda hidrojen salımına ve alımına izin verir, bu da onları taşınabilir uygulamalar için dezavantajlı kılar (Şekil 2). Ayrıca, kompleks hidrürlerden hidrojen alma (desorpsiyon), metalik ve iyonik hidrürlere kıyasla daha karmaşıktır.



Şekil 6.1. Bazı Kompleks Hidrürlerin Ağırlıkça Ve Hacimce Hidrojen Depolama Kapasiteleri Ve ABD Enerji Bakanlığı (DOE)'Nin Hafif Araçlar İçin Koyduğu Hedeflere Göre Kıyaslaması [24].



Şekil 6.2. Çalışma sıcaklıkları da dikkate alındığında kompleks hidrürlerin ve diğer hidrojen taşıma sistemlerinin ağırlıkça depolama kapasiteleri ile ABD Enerji Bakanlığı (DOE)'nin koyduğu hedeflere göre kıyaslaması [24].

Bu kapsamda, son zamanlarda metal hidrür malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar, tipik olarak bir kompleks anyona iyonik olarak bağlı alkali veya toprak alkali elementlerden oluşan karmaşık hidrürlerin geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır. Bu malzemeler geçiş veya ana grup metalleri veya metaloidlerinin (örneğin Fe, Ni, B, Al) ve azotun hidrojeni kovalent olarak bağlaması ile oluşan anyonlar ve alkali veya toprak alkali katyonlarından oluşmaktadır. Bu malzemelerle ilgili daha yüksek gravimetrik ve hacimsel hidrojen yoğunluğuna ulaşmak için artan bir ilgiyle, hidrojen bağlama ve salım reaksiyonlarının tersinirliği ve bu proses için ısı iyileştirme çalışmaları yürütülmektedir. Sadece hacimsel ve gravimetrik kapasiteleri değil, aynı zamanda hidrojen adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetiğini, reaksiyon termodinamiği ve uzun adsorpsiyon/desorpsiyon döngü kararlılığı üzerinde araştırma yapılması gereken konuların başında gelmektedir.

Metal hidrürlerin bileşimine ve yapısal özelliklerine bağlı olan hidrojen depolama kapasiteleri, kinetikleri, döngü stabiliteleri, basınçları ve termal tepkileri dahil olmak üzere elektrokimyasal ve gaz halindeki hidrojen depolama özelliklerini iyileştirmek için üzerinde yoğun araştırmalar yapılan sistemler olarak ilgi görmektedirler. Rekabetçi hidrojen depolaması için gelecek vaat eden adaylar olarak, desorpsiyon sıcaklıklarını düşürmek ve kinetiklerini ve döngü ömürlerini iyileştirmek için bir grup magnezyum bazlı hidrit üzerinde çaba sarf edilmiştir. Uygun bir katalizör ekleyerek ve hızlı söndürme veya bilyeli öğütme yoluyla pratik uygulama hedefine ulaşmak için daha fazla araştırma gereklidir. Karmaşık hidritlerin kinetiğini ve döngü ömrünü iyileştirmek, hidrojen enerjisinin potansiyel uygulamaları için de önemli bir husustur.

Metal hidrür formunda hidrojen depolama sistemleri için yüksek hacimsel ve gravimetrik kapasiteleri, hidrojen adsorpsiyon/desorpsiyon kinetiğini, çevrim ömrü ve reaksiyon termodinamiğini geliştirmeye yönelik yeni malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin kullanımı ile sistem iyileştirme çalışmalarının yürütülmesine ihtiyaç vardır.

Kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin kullanılması ile, hacimsel ve gravimetrik kapasite iyileştirme, depolama performans iyileştirmesi ve kullanılmış depolama malzemesi için verimli rejenerasyon süreçlerinin geliştirilmesi için çalışmaların yapılması gerekmektedir. Özellikle metal hidrürler için yeni metal hidrür malzeme geliştirilmesi, potansiyel malzeme adaylarının hacimsel ve gravimetrik kapasitelerinin, çevrim ömürlerinin, hidrojen adsorpsiyon/desorpsiyon kinetiğinin ve reaksiyon termodinamiğinin geliştirilmesi ve kullanılan malzemelerinin geri kullanımı proseslerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kimyasal hidrojen depolama

malzemelerinin devam eden problemlerinin çözümü için özellikle aşağıda listelenen alanlarda AR-GE ve ÜR-GE çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir.

- Yeni kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin geliştirilmesi için teorik modelleme çalışmalarının yürütülmesi
- Kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin bozunum özelliklerinin belirlenmesi için gerekli kinetik çalışmaların yürütülmesi
- Kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin hidrojen depolama kapasitelerinin ve bu performansın tersinirliğinin ve tekrarlanabilirliğinin iyileştirilmesi
- Yüksek gravimetrik kapasiteye sahip kimyasal hidrojen depolama malzemelerinin uygun sıcaklık ve basınçlarda tersinir olarak hidrojen depolama/salma proseslerini yüksek hızda ve uzun çevrim ömründe gerçekleştirmelerinin sağlanması
- Gelecek vaat eden malzemeler için uygun maliyetli sentez süreçlerin geliştirilmesi ve ölçek büyütmesi çalışmalarının gerçekleştirilmesi

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kriting sistemlerinin geliştirilmesi

Hidrojen depolama sistemlerinin hedeflerine ulaşmak için farklı depolama teknolojileri geliştirilmektedir. Depolama sistemlerinin en önemli problemi sistemin enerji kapasitesidir. Çünkü toplam kapasitenin hemen hemen yarısı sistem bileşenlerinin tarafından harcanmaktadır. Bir enerji taşıyıcısı olarak metan/doğal gaz ve metanol, enerji kapasitesi ve dağıtım altyapısı açısından hidrojene göre önemli avantajları vardır. Ancak özellikle hareketli sistemlerde CO₂ yakalama sistemlerinin zorluğu sebebiyle CO₂ emisyonlarına neden olmaktadır. Hidrojenin yanı sıra amonyak, karbon içermeyen tek kimyasal enerji taşıyıcısı olarak bilinmektedir. Amonyak, yüksek toksisitesi nedeniyle potansiyel bir yakıt olarak göz ardı edilmiştir. Ancak metal aminler (örn. Mg(NH₃)₆Cl₂ ve Ca(NH₃)₈Cl₂) olarak amonyağın tersinir şekilde depolanması üzerine yapılan çalışmalar amonyağın toksisitesinin oldukça düşürülebileceği (standart basınç ve sıcaklıktaki amonyağa göre %33 daha az toksisite) ve böylelikle ağırlıkça %10'a kadar hidrojenin pratik ve geri dönüşümlü olarak depolanabileceğini göstermektedir. Amonyakın farklı formlarda depolanması da mümkündür. Örneğin amonyum format/ bikarbonat temelli sıvı hidrojen taşıyıcılar üzerine yoğun çalışmalar yürütülmektedir.

Günümüzde amonyak Haber–Bosch prosesi ile 200-350 bar basınç ve 300-550 °C sıcaklık altında katalitik olarak yaklaşık %15 verimle üretilmektedir. Bu proseste yoğun bir şekilde fosil yakıt kullanımı gerektirmektedir. Fosil yakıtların kullanımı ortadan kaldırılarak amonyak yeşil hale getirilebilmesi çalışmaları büyük ilgi görmektedir. Suyun elektrolizi ile üretilen hidrojenin

havadan elde edilen azot ile birleştirilmesi ile yeşil amonyak şeklinde depolanması mümkündür. Yeşil amonyak sentezi sırasında hidrojen-azot reaksiyonu için gereken sıcaklık ve basınç, rüzgâr veya güneş enerjisi gibi sürdürülebilir enerji kullanılarak sağlanması gerekmektedir. Bu şekilde üretilen yeşil amonyak bilinen karbonsuz amonyaktır ve hidrojen kaynağı veya yeşil gübreler için birincil hammadde olarak kullanılabilir.

Amonyak üretiminde diğer bir yaklaşım, bir azot elektrolizöründe, azotun amonyağa indirgenmesi ve suyun oksijene yükseltgenmesi ile gerçekleşen bir elektrokimyasal reaksiyonunun kullanımı üzerinedir. Her iki elektrottaki aşırı potansiyelleri azaltmak için katot ve anotta azot indirgeme katalizörü ve oksijen oluşum katalizörü kullanılmaktadır. Azotun elektrokimyasal olarak amonyağa indirgenmesi için yüksek aktiviteye ve seçiciliğe sahip bir elektrokatalizör gereklidir. Elektrolizör bu şekilde güçlü (N≡N) üçlü bağı kırarak azot adsorpsiyonu ve aktivasyonunu kolaylaştırır. Metal, geçiş metali nitrürleri, ve metal organik çerçeveden türetilen karbon yapıları amonyak üretiminde kullanılan seçici katalizörlerin başında gelmektedir. Son zamanlarda bu konuda çekirdek-kabuk nanomalzemeler (ör: Vanadyum oksit çekirdeği ile vanadyum nitrür kabuk nanomalzeme) üzerinde çalışmalar yapılmaktadır ancak üzerinde halen tartışmalar devam etmektedir.

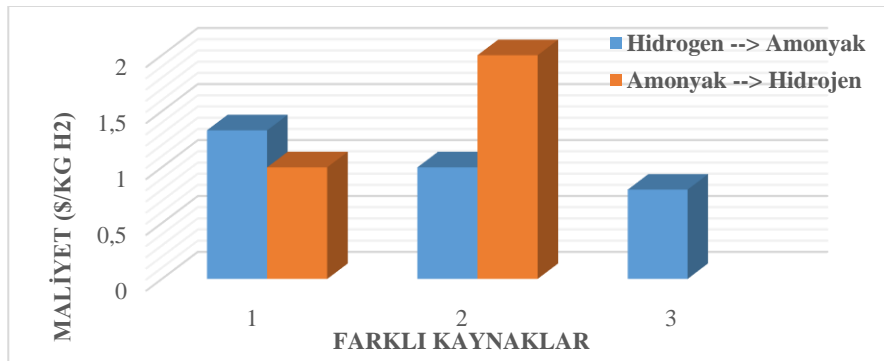
Amonyakın elektrokimyasal sentezi; Haber-Bosch sürecinden potansiyel olarak daha yüksek enerji verimliliği, karbon içermeyen yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, gelgit ve rüzgâr) kullanılması sebebiyle çevresel uyumluluk, modüler ve küçük ölçekli operasyonlarda kullanılabilirliği ve ölçeklenebilirlik ve isteğe bağlı yerinde NH₃ üretimi gibi birçok konuda önemli avantajlara sahiptir.

Son zamanlarda Haber-Bosch prosesinin yerini alacak elektrokimyasal amonyak sentez proseslerinin geliştirilmesine yönelik çabalar büyük ilgi görmektedir. Doğrudan azot elektrolizi veya elektrokimyasal azot indirgemesi, NH₃ üretimi için ilgi çeken yaklaşımlar arasında yer almaktadır, çünkü hammadde olarak ucuz ve bol azot gazı ve H₂O kullanılarak çevre koşullarına yakın koşullarda elektrokimyasal azot indirgemesi gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüz teknolojisi ile azot elektrolizöründe amonyak üretim maliyeti Haber-Bosch prosesine göre oldukça yüksektir. Bu durum azot indirgeme katalizörlerinin düşük verimlerinden kaynaklanmaktadır. Bugün bu proseslerdeki en büyük zorluklardan biri, moleküler azotu aktivite ederek kimyasal yapıdaki üçlü bağı kırmamanın yeni yollarının bulunması ihtiyacıdır. Özellikle N-N bağı kırabilen ve NH_x türlerinin oluşumunu tetikleyebilecek yeni katalizörlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Termodinamik olarak, elektrokimyasal azot indirgenmesinin mümkün olduğu görülmektedir. Ancak şu ana kadarki çalışmalar, azotun amonyağa indirgenmesine karşı kullanılan katalizörlerin yüksek aşırı gerilimi ve çok düşük seçicilik problemi henüz çözülememiştir.

Hidrojenin amonyak olarak depolanan hidrojenin son kullanım sisteminde tekrar elde edilebilmesi için amonyağın azot ve hidrojene ayrıştırılması gerekmektedir. Bununla birlikte, amonyağın hidrojen ve azota ayrışması endotermik bir işlem olması nedeni ile geleneksel katalitik ayrışma reaksiyonlarında, yeterli miktarda hidrojen gazı elde etmek için büyük miktarda ısı ilavesi gerektirdiği anlamına gelip yüksek maliyete sebep olduğu bilinmektedir. Ancak amonyak, günümüz katalizörleri ile 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda katalitik olarak ayrıştırılabilmektedir. Bu alanda amonyağın verimli kriting prosesi için düşük sıcaklıklarda çalışacak üstün kriting katalizörlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Amonyağın verimli kriting prosesinde grafit üzerinde desteklenen sezyum destekli rutenyumun (300 °C üzerinde aktif) en iyi katalizörlerden biri olduğu bilinmektedir. Rutenyum oksitinin (RuO₂) nano partikülünden yapılmış katalizör ile amonyağın katalitik yüzeye adsorbansı ile sıcaklık artışı sağlanmaktadır. Sıcaklıktaki bu artış, ekzotermik bir prosese sahip olan amonyağın oksidatif dekompozisyonunu katalize eder. Düşük sıcaklıkta amonyak bozunmasıyla ilgili en önemli zorluk, denge dönüşümünün sıcaklığa bağlı olması ve reaksiyonun endotermik olması, yani dengedeki amonyak konsantrasyonunun azalan sıcaklıkla artmasıdır. Bu problemin çözümü için, düşük sıcaklıkta aktif yeni katalizör sistemlerine ve ürün içindeki hidrojeni seçimli olarak ayırabilecek yeni membranların geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Amonyağın farklı formlarda depolanmasında mümkündür. Amonyum format/bicarbonat sistemi gibi amonyağı daha verimli ve hızlı şekilde düşük sıcaklık ve basınçlarda (20-80°C ve 1-50 bar) depolanması için kullanılacak yeni amonyak dönüşüm sistemlerinin ve katalizör sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Hidrojenin amonyağa çevrilme ve amonyağın tekrar hidrojene çevrilme maliyetleri Şekil 3'te verilmektedir [25-26]. Hidrojenin amonyağa çevrilme maliyeti 0,8 \$/kg H₂ – 1,33 \$/kg H₂, amonyağın tekrar hidrojene çevrilmesi de 1,0 \$/kg H₂ – 2,0 \$/kg H₂ değerindedir.



Şekil 6.3. Hidrojenin Amonyağa, Amonyağın Hidrojene Dönüştürülme Maliyetleri

Amonyak ile hidrojen depolama teknolojilerindeki durum Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. Amonyak İle Hidrojen Depolama Teknolojilerindeki Mevcut Durum

		Fiziksel Anlamı	Literatürdeki Son Bilgi (Veri Yılı)
Hidrojen yüzdesi	Taşıma	$M_{\text{hidrojen}}/ M_{\text{toplam}}$	%17,5 /ağ.)
Ağırlıkça yoğunluğu	enerji	$kWh_{\text{hidrojen}}/M_{\text{Toplam}}$	5,167 kWh/kg@-35C, 1 bar
Hacimsel Yoğunluğu	enerji	$kWh_{\text{hidrojen}}/V_{\text{Toplam}}$	3,0 kWh/L@25C, 10 bar 3,527 kWh/l@-35C, 1 bar
Dayanıklılık		Şarj deşarj çevrim sayısı	
Maliyet		Hidrojen Maliyeti üzerine eklenen \$/kWh Hidrojen, kWh/ kWh Hidrojen vb.	$H_2 \rightarrow NH_3$: 0,8\$/kg-1,33 \$/kg $\approx 0,15$ \$/kg H_2 (gemi) $NH_3 \rightarrow H_2$: 1,0\$/kg-2,0 \$/kg
Sıcaklık		°C	25 -- -35
Basınç		bar	10 bara – 1 bara
Toksosite çevresel etki	ve	Varsa ve etkisi	Toksik Karasal ekosistem için kronik tehlike

Hidrojen gazının amonyak olarak depolanması ve taşınması işlemlerinde yapılabilecek Ar-Ge faaliyetlerine bakıldığında iki konu öne çıkmaktadır [27]:

- Elektroliz yoluyla, geleneksel Haber-Bosch prosesine alternatif olarak “Direkt Amonyak Sentezi” prosesinin geliştirilmesi
- Amonyakın tekrar hidrojene dönüştürülmesi aşamasında kullanılacak katalizör ve sistemlerin geliştirilmesi.

Amonyak olarak taşınan hidrojenin tekrar hidrojene dönüşümü için amonyak kraking proseslerinin geliştirilmesi

Hidrojen temiz bir yakıt olarak sürdürülebilir enerjinin geleceği için oldukça önemli bir role sahiptir. Dünyada hidrojenin kullanılacağı birçok farklı alan bulunmaktadır; yakıt, hammadde, besleme stoku vb. Kimya sektöründe hidrojen petrol rafinerileri, amonyak, metanol, gıda ürünlerinin üretimleri, ilaç sektörü ve metal sanayide önemli ölçüde kullanılmaktadır. Hidrojen dolaylı olarak hidrojen – içerikli amonyak, metan, metanol gibi hafif kimyasallarda depolanma

özelliğine sahiptir. Ancak bu hafif kimyasalların içinde sadece amonyak karbonsuz kimyasal enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir. Özellikle hidrojenin taşınması hususunda amonyak oldukça iyi seçenek oluşturmaktadır. Buna ek olarak enerji yoğunluğu fosil yakıtlara yakındır ve bu değer sıkıştırılmış hidrojenden oldukça fazladır. Hidrojeni amonyakla taşıyıp, amonyağı üretim sahasında termal kriting yöntemiyle hidrojen ve nitrojen gazına ayırmak, hidrojenin özellikle uzak mesafelere taşınması açısından elverişli ve sıvılaştırılmış hidrojene kıyasla maliyet olarak da daha ucuzdur. Aynı zamanda hidrojenin kaynama noktası çok düşük olduğu için sıvı fazda taşınırken oluşacak kayıplarda taşıma mesafesi arttıkça artmaktadır. Sonuç olarak amonyağın hidrojene enerji vektörü olarak kullanılmasının depolama kolaylığı, hidrojen kaybının önüne geçilmesi ve maliyet düşüklüğü gibi avantajları mevcuttur.

Amonyak kriting metodu ile dekompoze olurken kullanılan katalizörlerle ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Özellikle Ni – Al₂O₃, Ni – CeO₂/Al₂O₃, Cr₂O₃, Ru/ZrO₂, Ru – Karbon Nanofiber gibi katalizörler ile yapılan çalışmalar literatürde yerini almıştır. Bu katalizörler için minimum 300 °C sıcaklıkta reaksiyonun gerçekleştiği belirtilmiştir. En etkili kriting katalizörü olarak Rutenium gösterilmektedir, çünkü amonyak dekompozisyonu için gereken yüksek basınç Rutenium katalizöründe oldukça düşmüştür. Ancak katalizörün maliyetinden dolayı Rutenium katalizör kullanarak amonyak kriting yöntemi kullanan az sayıda tesis bulunmaktadır.

Çevreye duyarlı (Green Hydrogen) yeşil Hidrojen üretme metodu sıfır emisyon değerine sahip, düşük maliyetli ve yaklaşık olarak %100 verime ulaşmak hedeflenmektedir. Amonyum kriting yöntemi hidrojen üretimi alanında kullanılmakta ve bu sürecin çevre duyarlılığı, verimliliği ve diğer operasyonel avantajları göz önüne alındığında araştırılması ve bu sürecin daha da geliştirilmesi bilimsel, endüstriyel ve çevresel açıdan öncelik kazanmaktadır.

Hidrojen ve amonyak kimyasal enerji taşıyıcısı ve yakıt kaynağıdır. Yakıt olarak kullanıldıklarında ikisinin de enerji salınımı karbon emisyonu içermez. Amonyak hidrojenin dolaylı olarak depolanması için bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bunun nedeni amonyağın dekompoze olması sonucu hidrojen ve azot gazı çıkmasıdır. Bu yaklaşımla amonyak, hidrojenin depolanması için bir alternatif olarak da düşünülebilir. Bu özelliğe ek olarak amonyağın yanma prosesi geçirdiği takdirde açığa NO_x salınacağından dolayı, hidrojene taşıyıcı özellikte kullanılması ya da dekompozisyonu sonucu hidrojen üretimi yapılması amonyağında daha efektif kullanılmasını sağlar.

Amonyagın katalitik dekompoze olması birçok faktörden etkilenir; sıcaklık, basınç, katalizör tipi, gaz fazın saflığı ve kompozisyonu, spesifik yüzey alanı vb. Gaz fazdaki amonyak katalizörün yüzeyinden adsorbe edilir ve hidrojen ve azot gazına ayrışır. 1933 yılında en temel olarak Burke amonyaktan hidrojen üretme metodunu geliştirmiştir. Sıvı amonyak bir tüpün içerisinde 550–650 °C kadar ısıtılarak tüpün içerisinde bulunan uygun bir katalizöre akması sağlanmıştır ve %90'a yakın bir amonyak dekompozisyonu izlenmiştir. Kriting reaksiyon

katalizör olmadan 773 K ve üzeri sıcaklıklarda başlar. Ancak katalizör varlığında bu sıcaklık 698 K kadar inmekte ve % 98 - % 99 verimli reaksiyon gerçekleşmektedir.

Amonyak prosesleri endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Amonyaktan hidrojen üretimi için çalışmalar ve araştırmalara örnek olarak İngiltere’de yapılan bir çalışma gösterilebilir. Hidrojeni İngiltere’de üretmek, Orta Doğu’dan amonyak halinde taşımaktan daha pahalıya geliyor. Dolayısıyla bunun üzerine araştırmalar hız kazanmıştır ve İngiltere’de 2035 yılı için yapılan özel bir çalışmaya göre gelecekte Amonyak’ı Ortadoğu coğrafyasından taşıyıp, İngiltere’de kriting uygulayarak Hidrojen gazı üretimi yapılarak yeşil enerji üretilmiş olacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyesi (THS)

Teknolojik Seviyeleri	Hazırlık	Dünyada	Türkiye’de
THS 1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kriting sistemlerinin geliştirilmesi

Teknolojik Seviyeleri	Hazırlık	Dünyada	Türkiye’de
THS 1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

Singapur menşeli küresel enerji depolama grubu (GES) enerji depolama sistemlerinden oluşan küresel bir ağ kuruyor. Hedef, önümüzdeki beş yıl içinde, başlangıçta Avrupa ve Asya'da olmak üzere, yeşil hidrojenle dahil kahverengi ve yeşil enerji depolama sistemleri için yaklaşık 250 milyon \$ yatırım yapmak olarak verilmiştir. Firmanın geliştirdiği proje ile, enerji akışlarının kilit kavşağında bulunan genişletilebilir platformlar oluşturarak depolama ve lojistik ihtiyaçlarını kolaylaştırmak olduğu görülmektedir [28].

Amerikada Yakıt Pili Teknolojileri Ofisi (FCTO'lar) uygulamalı malzeme bazlı hidrojen depolama teknolojisi araştırma, geliştirme ve gösterim (RD&D) faaliyetleri ile hafif ticari araç sistemini karşılama potansiyeline sahip hidrojen depolama tankları için malzeme ve sistemlerin geliştirilmesi projeleri geliştirip yürütmektedir [29].

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

GKN Hydrogen firması 165 kWh ile 8 MWh arasında enerji depolama kapasitesine sahip farklı ölçeklerde metal hidrür temelli hidrojen depolama modülleri üretmektedir [30]. Hystorsys firması farklı ölçeklerde ve enerji depolama kapasitesine (700 kWh ile 8,4 MWh)) sahip metal hidrür hidrojen depolama modüllerinin üretimini ve pazarlamasını yapmaktadır (<https://www.hystorsys.no/>). Pragma-industries firması benzer şekilde farklı ölçeklerde ve enerji depolama kapasitesine sahip metal hidrür hidrojen depolama modüllerinin üretimini ve pazarlamasını yapmaktadır [31]. Tayvan menşeli H Bank Technology Inc. firmasında metal hidrürler dahil farklı hidrojen depolama sistemlerini geliştirip pazarlamaktadır [32].

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kraking sistemlerinin geliştirilmesi

The Stami Green Ammonia technology firması özellikle yakıt ve gübre hammaddesi olarak kullanılacak amonyak üretim sistemleri geliştirmektedir [33]. Kapsom firması yeşil hidrojen üretim tesisleri geliştirip sistem bileşenleri olan sentez kuleleri, ısı değiştiriciler ve kompresörler gibi bileşenlerle ilgili AR-GE ve ÜR-GE çalışmaları yürütmektedir [34].

Thyssenkrupp Industrial Solutions firması yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik ile suyun elektrolizi ile ürettikleri yeşil hidrojen ve havadan elde ettikleri azot ile yine yenilenebilir enerjinin kullanıldığı Haber–Bosch prosesi ile yeşil amonyak üretebilen teknolojiler geliştirmektedir [35]. Suudi Arabistan da Amerikanın 'Air Products and Chemicals', ve Suudi ACWA Power, ve NEOM firmalarının yürüttükleri 5 milyar \$bütçeli bir yeşil amonyak üretimi projesi yürütmektedir. Amerikanın 'Air Products and Chemicals' firması Japonyada bir yeşil amonyak üretim tesisi kurmaktadır. Güneş ve Rüzgar enerjisiyle çalışan 4 GW kapasiteli elektrolizörler ile üretilen hidrojen ve havadan elde edilen azotun kullanıldığı Haber-Bosch prosesi ile yılda 1,2 milyon ton yeşil amonyak üretmemeyi hedeflemektedir [36]. Air Products and Chemicals' firması yeşil hidrojen üretimi ve amonyak dahil farklı depolama sistemleri geliştirme üzerine sistemler geliştirmektedir [37].

Amonyak olarak taşınan hidrojenin tekrar hidrojene dönüşümü için amonyak kriting proseslerinin geliştirilmesi

Hidrojen birçok kimyasal süreçte kullanıldığı için talep yüksektir. Amonyaktan hidrojen üretimi için kriting prosesi kimyasal verimliliği yüksek olduğu için kriting yapan firmalar vardır. Air Products Co yakıt hücreleri ile çalışan otobüs ve ağır taşıtlar için amonyaktan hidrojen dönüşümü uygulamaktadır. Ayrıca Northwester Üniversitesinde Prof. Dr. Sossina Haile ve araştırma grubu (Prof. Dr. Sossina Haile materials science and engineering at Northwestern's McCormick School of Engineering) kriting prosesini yenilenebilir enerji kullanarak amonyaktan hidrojen üretmeyi hedefliyor.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

6.3. Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kriting sistemlerinin geliştirilmesi

Kimya, fizik, kimya mühendisliği, malzeme ve metalürji mühendisliği, makina mühendisliği ve elektrik elektronik mühendisliğinden uzmanlar ile enerji temelli sektörlerin biraraya gelip çalışmaları gerekmektedir.

Ülkemizdeki enerji alanında Ar-Ge ve Ür-Ge yapan firmalar (ASPİLSAN, SOCAR, TÜPRAŞ gibi), araştırma geliştirme enstitüleri ve TÜBİTAK MAM gibi araştırma merkezleri

Amonyak kraking için katalizör ve proses geliştirmek amacıyla üniversitelerin kimya mühendisliği, kimya bölümü, malzeme mühendisliği ve rafineri ve petrokimya alanlarından özel sanayi kuruluşları ile ortak çalışmalar yürütebilirler.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

6.3. Yeşil hidrojen depolama teknolojilerinin geliştirilmesi

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kraking sistemlerinin geliştirilmesi

Üniversitelerde gerçekleştirilen yüksek lisans/doktora çalışmaları büyük ve küçük ölçekli sanayi kuruluşlarının ihtiyaçları dikkate alınarak kurgulanmalı ve Üniversite-Sanayi işbirliği destekleri arttırılmalıdır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmaların üretime taşınması sırasında Üniversite-Sanayi işbirliği önem arz edecektir. Uluslararası İşbirlikleri ile önerilen çalışmalar ülkemizde katma değeri yüksek ürün üretiminin gerçekleşmesini sağlayacaktır.

Ayrı yürüyen projeler, büyük bir platform bünyesinde eşgüdüm içinde yapılacak projeler vb.

Bu noktada hidrojen teknolojileri özelinde kurulan kobi ve büyük ölçekli firmaların da yararlanabileceği bir fon mekanizması kurularak bu fonun bir platform tarafından yönetilmesiyle bir hidrojen teknolojileri ekosistemi oluşturulması uluslararası teknoloji seviyelerinin yakalanması açısından büyük önem taşımaktadır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

6.3.a. Fiziksel hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi

- Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl

Kısa ve orta vade

- Ayırılması gereken tahmini bütçe: 10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

6.3.b. Kompleks metal hidrürler ve diğer ileri hidrojen depolama malzemelerin (Borofen, Borofulleren, Amonyaboran, Lityum amonyaboran, Metal borhidrürler, Lityum ve sodyum alanatlar vb.) ve proseslerin geliştirilmesi

- Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl
- Kısa ve orta vade
- Ayırılması gereken tahmini bütçe :10-50 milyon TL Ar-Ge ve 50-100 milyon TL yatırım.

6.3.c. Yeşil hidrojen kullanımında amonyak depolama ve amonyak kriting sistemlerinin geliştirilmesi

- Ar-Ge süresi: Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl
- Kısa ve orta vadede
- Ayırılması gereken tahmini bütçe:100-300 milyon TL Ar-Ge ve 500-1000 milyon TL yatırım.

Amonyaktan kriting metodu ile hidrojen üretimi katalitik bir süreçtir ve prosesin optimizasyonu ve verimliliğini artırma çalışmaları için birden fazla katalizör üretilmesi gerekebilir. Bunun için sanayi Ar – Ge birimlerinin akademik araştırma grupları ile birlikte çalışması gerekmektedir. Orta/uzun vadede amonyak kriting proses teknolojisinin geliştirilmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Böyle bir Ar-Ge çalışması için yaklaşık 3.000.000 Avro bütçe öngörülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamu teşviklerinin sağlanması ve sanayi içerisindeki iş birliklerinin artırılmasına yönelik birleştirici rolü üstlenmesi. Kamunun gerekli destekleri (sübvansiyon ve vergi muafiyeti gibi) sağlayıp özel sektör için cazip hale getirmesi.

Sanayi iş birliğindeki Ar-Ge çalışmaları ve destek süreci sadece hidrojen depolama sistemleri geliştirme alanında değil, tüm değer zincirinin yaratılıp Türkiye geneline yayılmasında rol oynamayı hedeflemelidir. Hidrojen depolama teknolojilerindeki fiziksel ve kimyasal süreç iyileştirmelerinin uygulama alanları yaratılarak farklı birçok sektör oyuncusunu hem mali hem teknolojik açıdan bir araya getirmek kritik bir önem arz etmektedir. Dünyada başarılı uygulamalarına rastlanan yeşil hidrojen vadileri, hub'ları ve değer zinciri yaratma girişimleri

takip edilerek, Türkiye’de bir benzerini oluşturma girişimleri gerek Ar-Ge projeleri ile gerekse akademik çalışmalar ile desteklenmelidir. Tüm sektörlerin ortak paydada buluşması, yeşil hidrojen özelindeki ticari arz/talep dengesinin saptanarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Ülkemiz için olgunlaşmış alt yapı hazırlığının otuz yılı aştığı DG baz alındığında, yeşil hidrojen için hem üretimde hem de pazar içerisinde yer edinilmede daha hızlı ve sağlam adımlarla ilerlenmesi gerekmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Hidrojen yol haritasının oluşturulması. Hidrojen üretimi, depolaması ve kullanımı konularında teşvik edici mevzuatlar oluşturulmalıdır. Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir.

Teknik Altyapılar

Üretim, test ve sertifikasyon altyapıları yeterli değildir. Kısa ve orta vadede üretim, test ve sertifikasyon altyapıları oluşturulmalıdır. Örneğin TÜBİTAK önderliğinde makul ücretler karşılığında sertifikasyon ve test hizmetlerinin sunulması gerekmektedir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde yeterli düzeyde yetkinlikte AR-GE insan kaynağı mevcuttur. ÜR-GE için insan kaynağı desteklerine ihtiyaç vardır.

Destek ve Teşvikler

Oluşturulacak destek ve teşvik mekanizmalarının şirket ölçeğinden (kobi ve büyük ölçekli) bağımsız olarak sağlanması gerekmektedir. Oluşturulacak teşvik ve destek mekanizmalarında endüstrideki paydaşların ve üniversitelerin iş birliği zorunlu kılınmalıdır. Böylelikle ülke çapında hidrojen teknolojileri üzerine tecrübenin hızlı ve kümülatif şekilde artırılması sağlanmalıdır. Ayrıca yetişmiş insan kaynağının artırılması için sanayinin ihtiyacını karşılayacak projelerin üniversitelere yaptırılması ve bu projelerin %100 desteklenmesi gerekmektedir. Bu sayede sanayi paydaşlarına ekonomik olarak yük bindirilmemesi ve sanayinin eforunun ürün odaklı olması amaçlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1]. <https://www.energy.gov/>
- [2]. <https://eisenhuth.de/en/products/>
- [3]. <https://dioxidematerials.com/>
- [4]. <https://www.tek-sis.com/tr/sayfa/163/hidrojen-uretim-sistemleri>
- [5]. <https://www.ineos.com/businesses/ineos-electrochemical-solutions/business/>

- [6]. <https://english.peric718.com/>
- [7]. <https://nelhydrogen.com>
- [8]. <https://www.ineos.com>
- [9]. <https://www.plugpower.com>
- [10]. <https://itm-power.com>
- [11]. <http://www.peric718.com>
- [12]. <http://hidronerji.com.tr>
- [13]. <https://www.aspilsan.com/>
- [14]. <https://shilpent.com/other-products/84-photocatalytic-reactor.html>
- [15]. <https://plasmonics.tech/photoreactor-technology>
- [16]. Dinçer, İ., Eroğlu, İ., Öztürk, M., “Türkiye için Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası”, 2021 https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf
- [17]. Zhou, L. 2005. “Progress and problems in hydrogen storage methods,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9, 395–408.
- [18]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>**
- [19]. Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M. 2007. “Metal hydride materials for solid hydrogen storage:A review“ International Journal of Hydrogen Energy,32, 1121-1140.
- [20]. Rusman, N.A.A, Dahari, M. 2016. “A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications” International Journal of Hydrogen Energy, 41, 12108-12126.
- [21]. Pasquini, L., Sakaki, K., Akiba, E., Allendorf, M.D., Alvares, E., Ares, J.R., Babai, D., Baricco, M., Bellosta von Colbe, J., Berezniisky, M., Buckley, C.E., Whan Cho, Y., Cuevas, F., de Rango, P., Dematteis, E.M., Denys, R.V., Dornheim, M. Fernández, J.F., Hariyadi, A., Hauback, B.C., Heo, T.V., Hirscher, M., Humphries, T.D., Huot, J., Jacob, I., Jensen, T.R., Jerabek, P., Kang, S.Y., Keilbart, N., Kim, H., Latroche, M., Leardini, F., Li, H., Ling, S., Lototsky, M.V., Mullen, R., Orimo, S., Paskevicius, M., Pistidda, C., Polanski, M., Puzkiel, J., Rabkin, E., Sahlberg, M., Sartori, S., Santhosh, A., Sato, T., Shneck, R.Z., Sørby, M.H., Shang, Y., Stavila, V., Suh, J., Suwarno, S., Thu, L.T., Wan, L.F., Webb, C.J., Witman, M., Wan, C., Wood, B.C., Yartys, V.A. 2022. “Magnesium- and intermetallic alloys-based hydrides for energy storage: modelling, synthesis and properties“ Progress in Energy, 4, 1-48.
- [22]. Srinivasan, S.S., Brinks, H.W., Hauback, B.C., Sun, D., Jensen, C.M. 2004. “Long term cycling behavior of titanium doped NaAlH₄ prepared through solvent mediated milling of NaH and Al with titanium dopant precursors” Journal of Alloys and Compounds, 377, 283-289.

- [23]. George, L., Saxena, S.K. 2010. “Structural stability of metal hydrides, alanates and borohydrides of alkali and alkali- earth elements: a review“ International Journal of Hydrogen Eenergy, 35, 5454-5470.
- [24]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/material>
- [25]. Hydrogen Council, “Hydrogen Insights: a perspective on hydrogen investment, market development and cost compotitiveness” McKinsey&Company, 2020.
- [26]. Päivi T. Aakko-Saksa, Chris Cook, Jari Kiviaho, Timo Repo, 2018. Liquid organic hydrogen carriers for transportation and storing of renewable energy – Review and discussion, Journal of Power Sources 396, 803–823.
- [27]. Sinigaglia, T., Lewiski, F., Martins, M.E.S., Siluk, J.C.M., 2017. Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. International Journal of Hydrogen Energy 42 (39), 24597–24611.
- [28]. <https://www.global-energy-storage.com/contact>
- [29]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>
- [30]. <https://www.gknhydrogen.com>
- [31]. <https://www.pragma-industries.com/>
- [32]. <http://www.hbank.com.tw>
- [33]. <https://www.stamicarbon.com/>
- [34]. <https://www.kapsom.com/>
- [35]. <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/>
- [36]. <https://cen.acs.org/>
- [37]. <https://www.airproducts.com/>

Teknolojik Hedef 7:

**YEŞİL KİMYADA İLERİ AYIRMA TEKNOLOJİLERİ-
MEMBRANLAR VE ADSORBANLAR**

*Kimyasallar üretiminde kullanılan ayırma malzemelerinin ve
proseslerinin daha çevre dostu hale getirilmesi*

Kritik Ürün/Teknoloji 7.1.

7.1. Membran üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması**
- 7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi**
- 7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi**
- 7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi**
- 7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi**

Kritik Ürün/Teknoloji 7.1.**7.1. Membran üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler****A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler**

Membran, iki homojen faz arasında seçici geçirgen bir bariyer olarak tanımlanabilir ve bu bariyerden taşınım besleme çözeltilisine sürücü kuvvetin uygulanması ile gerçekleşir (Tablo 7.1). Membranlar, organik ve inorganik hammaddelerden üretilmektedir. Organik yapıya örnek polimerik membranlar, inorganik yapı için en yaygın kullanım olan seramik membranlar söylenebilir.

Tablo 7.1. Bazı membran prosesler ve sürücü kuvvetleri.

Membran Prosesi	Faz 1	Faz 2	Sürücü Kuvvet
Mikrofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Ultrafiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Nanofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	Basınç
Ters Ozmoz	Sıvı	Sıvı	Basınç
Gaz Ayırma	Gaz	Gaz	Basınç
Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	Basınç
Elektrodiyaliz	Sıvı	Sıvı	Elektriksel Potansiyel
Membran Kontaktör	Sıvı	Sıvı	Konsantrasyon
Membran Distilasyonu	Sıvı	Sıvı	Sıcaklık veya Basınç

Basınçla çalışan membran prosesleri; mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz geri kazanım uygulamalarında son yıllarda önemli rol oynamaktadır. Basınçla çalışan membran ayırma sistemleri, geleneksel filtreler, damıtma sistemleri ve iyon değişim reçinelerine göre enerji tüketimi kabul edilebilirdir ve yüksek ayırma özellikleri gösterirler.

Membranlar yapılarına göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar;

1. Gözenekli membranlar (mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon)

Büyük gözenekli (>50 nm)

Orta gözenekli (2-50 nm)

Küçük gözenekli (<2 nm)

2. Gözeneksiz (yoğun) membranlar (nanofiltrasyon, ters osmoz).

Sentetik membranlar kullanarak yapılan ilk diyaliz deneyi 1861 yılına kadar dayanmaktadır (Graham T.). Membran filtrasyonu ayırma prosesleri içerisinde 1970'li yıllara kadar önemli görülmemekte iken kullanımı giderek yaygınlaşan ve teknolojisi geliştirilen bir teknoloji olmuştur. Ayırma ve saflaştırma özellikleriyle membran prosesler hem endüstriyel üretimlerde hem de su/atıksu arıtımında kullanılmaktadır. Kullanım amacına uygun membran seçimi önem taşımaktadır ve membran veya katalitik membran olarak kullanılabilirler.

Son yıllarda membran teknolojileri sürekli gelişmektedir. Genellikle fosil esaslı polimerlerin kullanımı membranların sürdürülebilirliklerini sınırlandırmaktadır. Plastik atıkların çevresel etkisinin genel bir küresel sorunu temsil ettiği ve bertaraf teknolojilerinin sınırlı olduğu bilindiği için büyüyen çevre kirliliği, membran üretimi için geleneksel polimerlerin yerini alabilecek potansiyel doğal polimerlerin araştırılması için başlangıç noktası olmuştur.

Avrupa Birliği'ndeki yeni döngüsel ekonomiye geçiş çalışmaları çerçevesinde, petrokimya (fosil) esaslı polimerlerin yerine artan talebe cevap vermek için biyo esaslı polimerler alternatif olarak tanıtılmaktadır. Yeşil çevre temelli girişimler ve düzenlemeler, gelecek için çevreyi korumaya ve iyileştirmeye olan ilgiyi artırmıştır. Düşük toksisite ve düşük çevresel etkiyi temsil eden ürünlerin talebi ve arzının artması hedeflenmektedir. Bu senaryonun gerçekliği tüketici fiyatına ve nihai performansa bağlıdır. Beklenti, biyopolimer esaslı ürünlerin özelliklerinin petrokimya ürünlerine dayalı olanlara benzer olması yönündedir. Bu anlamda biyoplastikler, biyolojik kaynakların kullanımı yoluyla petrokimyasallara olan bağımlılığı değiştirebilecek veya en azından azaltabilecektir.

Sürdürülebilirliğe yönelik dünya çapında artan eğilim ile birlikte bitkisel ve hayvansal kaynaklardan ve bakteriyel fermantasyon ürünlerinden elde edilen biyopolimerlerin çalışmalardaki kullanımları da hızla artmıştır. Biyo esaslı polimer üretimindeki mevcut yaklaşım, sürdürülebilir süreçler ve yeşil kimya kullanarak yeni kimyasalların üretimi için biyokütlenin tam kullanımını içermektedir. Biyo esaslı polimerlere olan dünya genelindeki ilgi sadece petrokimya esaslı polimer malzemelerin yerini alma arzusundan dolayı değil aynı zamanda biyoteknolojide elde edilen yenilikçi gelişmelerin bir sonucu olarak son yıllarda artmıştır.

Biyoplastiklerin biyolojik kaynaklardan ve/veya fosil (kömür veya petrokimyasal) kaynaklardan elde edilip edilmediğine bağlı olarak, biyo esaslı ve/veya biyolojik olarak parçalanabilir (biyobozunur) olarak tanımlanmaktadır. Bunlar şöyle örneklenebilir:

- Yenilenebilir esaslı biyoplastikler veya biyo esaslı polimerler, bitkiler, hayvanlar veya mikroorganizmalar gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilir. Aljinatlar, karagenanlar, nişasta, kitin, kitosan, selüloz, bakteriyel selüloz, kolojen vb.
- Petrol bazlı biyoplastikler, petrolden elde edilen ancak biyolojik olarak parçalanabilen plastikler. Polikaprolakton (PCL), Polilaktik asit (PLA).

Günümüzde kullanılabilir su kaynakları giderek azalmaktadır. Ülkemiz, kişi başına düşen yıllık yaklaşık 1.346 m³ kullanılabilir su miktarı ile su azlığı yaşayan ülkeler arasında olup 2040 yılında su stresi yaşayacak ülkeler arasında gösterilmektedir. İklim değişikliği ile beraber yağış rejimlerinde dramatik değişikliklerin gerçekleşeceği ve sonucunda kullanılabilir su kaynaklarının azalacağı ülkemizde de ilgili kurumlarca ortaya konmuştur. Ülkemizde bulunan 25 nehir havzası için 2100 yılına kadar yapılan iklim tahminleri ve su kaynaklarına etkilerinin araştırıldığı çalışmanın sonuçlarına göre özellikle Akdeniz Havzalarında yağışlarda 250-300 mm/yıl oranında azalmalar göreceği, ülkemiz ortalamasında ise 60 mm/yıl azalacağı ortaya konmuştur. Ülkemizde su politikalarından sorumlu kurumlar artık suyun sadece nitelik değil nicelik olarak korunması yönünde önlemler almaktadırlar.

Su kaynaklarımızın su kalitesinin ve miktarının korunması amacı ile atıksuların arıtılıp yeniden kullanılması zorunlu bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu sebeple günümüzde çevre teknolojilerinde gelinen noktada atıksular ileri arıtma yöntemleri ile yeniden kullanılabilir hale gelmektedir. İleri arıtma teknolojilerinde membran prosesler son yıllarda önemli bir rol almaktadır. Su tüketiminin yoğun olduğu gıda, tekstil, metal, kağıt ve kimya endüstrilerinde su geri kazanım ve yeniden kullanım uygulamalarının kullanılması; ham su tüketiminin, alıcı ortama deşarj edilen atıksuların ve atıksuların içeriğinde bulunan kirletici miktarlarının azaltılmasında önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Ayrıca, ülkemizin 2030 yılı için %15 olan su geri kazanım hedefine ulaşılması açısından da membran teknolojilerinin önemi artmaktadır.

Ülkemizde kullanılan ve kullanılması teşvik edilen membran teknolojilerinin hemen hemen tümü ithal edilmektedir. Ancak son yıllarda atıksuların arıtılması maksadı ile MEMSİS tarafından geliştirilen polimerik kovuklu elyaf (hollow fiber) membranlar ve proses suyu hazırlamak maksadı ile AKKİM tarafından geliştirilen UF membran modüllerinin kullanımının arttığı da bilinmektedir.

Polimerik ve seramik membranların üretilmesi ve geliştirilmesinde yetişmiş insan kaynağı bulunmaktadır ancak ticarileştirme noktasında özel sektörün dahil edilmesi gerekmektedir. Mevcut teknoloji hazırlık seviyeleri ticarileştirmeye uygun membran çalışmalarının özel sektör

tarafından büyük ölçekli üretime geçirilmesi, Dünya’da çalışılan membran teknolojilerinin çalışılması için Ar-Ge yatırımlarının planlanması gerekmektedir.

Atık su arıtma tesislerinde farmasötiklerin biyolojik bozunması ve detoksifikasyonuna yönelik sistemlerin geliştirilmesi diğer önemli bir husus olarak ön plana çıkmaktadır. Su ortamında beşeri ve veteriner hekimlik ile zirai amaçla kullanılan farmasötiklerin anabilesik, metabolit veya diğer dönüştürülmüş formları mikrokirleticiler olarak değerlendirilmektedir ve çevre ile halk sağlığı açısından önem taşımaktadır. Teşhis, tedavi ve kontrol amacıyla kullanılan ilaçlar dışında ilaç üretim tesisleri ve yasaklı maddeler (uyuşturucular gibi) ile birlikte değerlendirildiğinde ise su ortamlarında farmasötik yük global anlamda artmaktadır. Evsel, hastane, hayvancılık ve zirai etkinliklerden salınan bu farmasötiklerin miktarı bozunma, ayrışma ve çözünme gibi ilaca bağlı faktörler, üretim miktarı, kullanım alışkanlıkları ve diğer çevresel faktörler gibi kullanımla ilgili faktörler gibi çeşitli etkilerle değişebilmektedir. Değişen konsantrasyonlarda özellikle beşeri ve veteriner hekimliğinde kullanılan antibiyotikler, antienflamatuvar/analjezik/antipiretikler, antineoplastikler/kanser ilaçları, nöroaktif (antiepileptikler, antidepresanlar, anksiyolitikler), kardiyovasküler (β -bloker, antilipidemik), diüretikler, hormonlar gibi çeşitli farmasötik aktif bileşiklerin kalıntıları tespit edilmektedir. Bu mikro kirleticiler, çok çeşitli karmaşık yapıları kapsadığından, sorpsiyon ve biyotik veya abiyotik bozunma yoluyla giderilme aralıkları, kimyasal ve çevresel matrisin yanı sıra organik madde içeriği ve su kimyası gibi diğer faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. Su ekosistemlerinden atık su arıtma tesisleri (AAT) ile etkin bir şekilde uzaklaştırılmayan bu farmasötik-mikro kirleticiler, benzer farmakolojik etkiler göstererek su organizmalarında (insan/hayvan/zirai ürün) spesifik moleküler ve metabolik yolları hedef alarak bağışıklık sistemini, normal mikroflorayı değiştirmekte, endokrin bozucu etki ile özellikle üreme sistemini ve hayatta kalmayı etkileyen nörolojiyi değiştirmektedir. Ayrıca en önemlisi antibiyotik direnci felaketine katkıda bulunmaktadır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

Fosil kökenli polimerlerin ve organik çözücülerin kullanıldığı membranların yerine biyokütle kökenli polimerlerin ve çözücülerin kullanıldığı membranlara geçiş vb. çevre dostu membran proseslerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Sürdürülebilir (yeşil, çevre dostu) membranlar, yeşil veya daha az zararlı çözücüler kullanılarak veya herhangi bir çözücü kullanılmadan hazırlanan membranlar olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca petrol türevi polimerlerin yerine yenilenebilir malzemeler kullanılarak hazırlanan

membranlar da daha çevreci membranlar olarak değerlendirilmektedir. Yeşil çözücüler, yeşil kimya prensibine dayalı olarak hem insan sağlığı hem de çevre üzerinde hiçbir riski olmayan, zararsız ve çevre dostu çözücüler olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir membran üretiminin gerçekleştirilebilmesi için biyo-bazlı veya biyolojik olarak parçalanabilir fosil bazlı polimerik malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Daha çevreci polimerik membranların geniş çapta uygulanmasını sınırlayan ana engeller, biyo-bazlı veya biyolojik olarak parçalanabilir fosil bazlı polimerlerin yeşil çözücülerde çözünürlüğünün sınırlı olabilmesi ve yeşil çözücülerin nispeten yüksek maliyete sahip olmasıdır. Bundan dolayı sürdürülebilir membran üretimi sırasında kullanılan çözücülerin ve yeşil polimerik materyallerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Polimer membranların kullanımındaki önemli problemlerden biri de besleme akımlarındaki bileşenlerin biri veya daha fazlası ile etkileşime girip ayırma özelliklerini zamanla yitirmeleridir. Gaz ayırmada plastikleşme olarak adlandırılan durum buna en güzel örnektir.

- Yenilenebilir kaynak bazlı biyopolimerlerin geliştirilmesi: Bitkilerden ve hayvanlardan doğal olarak sentezlenmekte veya tamamen yenilenebilir kaynaklardan sentezlenmektedir. Bu sınıf, nişasta (örneğin buğday, patates, mısır bazlı polimerler), selüloz (selülozik esterler), proteinler (bitkisel ve hayvansal protein bazlı polimerler), lignin, kitosan, polilaktik asit (PLA) (örneğin poli(d-laktit) (PDLA) veya poli(DL-laktit) (PDLLA) ve polihidroksialkanoatlar / polihidroksibutiratları (PHA/PHB) içermektedir. Biyolojik kaynaklardan polietilen, polipropilen ve naylon gibi polimerler de bu kategoriye girmektedir.
- Petrol bazlı biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin geliştirilmesi: Bu polimerler petrol türevli kaynaklarından sentezlenmekte olup işlevlerinin sonunda biyolojik olarak parçalanabilirler. Örneğin, Polikaprolakton (PCL) ve poli(bütülen süksinat) (PBS) gibi alifatik polimerler, poli(bütülen adipat-ko-tereftalat) (PBAT) gibi alifatik-aromatik polimerler ve poli(vinil alkol) (PVA) bu kategoriye dahildir.
- Kompozit biyopolimerlerin geliştirilmesi: Biyobazlı ve petrol monomerlerinin kombinasyonlarından oluşmaktadır. Poli(trimetilentereftalat) (PTT), biyo-termosetler (örneğin biyo bazlı epoksiler ve biyo bazlı poliüretan) ve biyo bazlı karışımlar gibi polimerleri içermektedir. Örneğin PTT, petrol türevi tereftalik asit ve biyolojik olarak üretilmiş 1,3-propandiol kullanılarak sentezlenebilmektedir.
- Çözücü içermeyen polimerik membran üretim yöntemlerinin geliştirilmesi: Suda çözünen polimerlerin kullanılması, çözücü içermeyen membran üretim yöntemlerinin kullanılması.
- Ester bazlı (örneğin trietil fosfat (TEP), sitrik asit esterler, metil laktat ve etil laktat, γ -Butirolakton, organik karbonatlar, butil asetat vb.), selüloz ve nişasta türevli (örneğin γ -

valerolakton), karşılık çözücüler (iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler, soya fasülyesi yağı) ve diğer çözücüler (dimetil sülfoksit (DMSO), N,N-Dimetil laktamit (DML), N-Metil-morfolin-N-oksit (NMMO), dimetil izosorbid (DMI)) ve potansiyel alternatif çözücüler (dibutil meleat (DBM), 2-pirolidon, trietilen glikol diasestat (TEGDA)) gibi yeşil çözücülerin geliştirilmesi

- Bazı yeşil çözücülerin günümüzde hala büyük ölçekli üretimi gerçekleştirilememesinden dolayı toksik çözücülere kıyasla genelde daha yüksek maliyete sahip olması (düşük maliyetli yeşil solvent üretimi ihtiyacı)
- Üretilen membranların geri dönüştürülebilir olması
- Yeniden kullanılabilir/geri dönüştürülebilir modül tasarımı
- Yeşil membranların mikroyapılarının ince ayarlanabiliyor olarak geliştirilmesi
- Yeşil çözücülerin endüstriyel membran uygulamalarında kullanılması
- Yaşam döngüsü analizi (LCA) kullanılarak geleneksel yöntemler ile üretilen membranların yeşil membranlar ile karşılaştırılması
- Membranların geliştirilmesinde ömür testi analizinin hızlı sonuç için simülasyonlarla yapılması
- Sürdürülebilir membranların kullanıldığı membranlı ayırma proseslerinin geliştirilmesi

Membran ayırma prosesleri, su/atıksu arıtımı, su/solvent arıtımı ve gaz ayırma gibi birçok alanda etkin ayırma performansı nedeniyle oldukça fazla kullanılan ileri arıtma teknolojilerindedir. Seramik membranlar ile karşılaştırıldığında, polimerik membranların daha düşük maliyet ve üretim kolaylığına sahip olduğu ve membran karakteristiğinin, değişken birçok parametre ile daha kolay ayarlanabildiği bilinmektedir. Membran teknolojisi, diğer ileri arıtım teknolojilerine kıyasla genellikle daha düşük enerji tüketimi ve yüksek verimliliğe sahip ayırma performansı sebebiyle “yeşil” bir teknoloji olarak kabul edilmiştir. Fakat, özellikle membran üretim süreci göz önünde bulundurulduğunda "membran üretim sürecinin kendisi yeşil mi?" cevaplanması gereken önemli bir soru haline gelmiştir. Membranlar hazırlanırken tüm membran malzemeleri, yani polimerler, katkı maddeleri ve çözücüler dikkate alınmalıdır. Örneğin polimer bazlı membranların üretimi sırasında her yıl 50 milyar litre civarında çözücüyle kirlenmiş atığın üretildiği tahmin edilmektedir (n-metilpirolidon (NMP) vb.). Bu çözücüler genellikle zehirli olup, hem ciddi sağlık problemlerine neden olmakta hem de büyük bir çevresel yük oluşturmaktadır. Bundan dolayı, petrol bazlı ürünler yerine biyo-bazlı ürünler veya biyolojik olarak parçalanabilir fosil bazlı polimer malzemeler değerlendirilmeli, geleneksel toksik çözücüler yerine toksik olmayan çözücüler kullanılmalıdır.

Ticari membran üretim proseslerinde çoğunlukla çözücü/solvent sistemleri ile çalışılmaktadır. Kullanılan çözücünün sistem boyunca kontrolü sağlanmalı ve geri kazanılmalıdır. Bu uygulama

alanında kullanılan çoğu polimerin petrokimya esaslı olması ve çözücülerin ise yüksek toksisite içermesi nedeniyle canlı yaşamına ve çevreye olan etkisi kontrollü sistemler kullanılmadığında büyük zararlar verebilmektedir. Görece bu sorunları azaltmak ve/veya bitirmek amacı ile sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen polimer ve çözücü sistemleri ile çalışılmalıdır. Ayrıca üretim hatlarındaki iyileştirmeler ile de sürece fayda sağlanabilir.

Yeşil Membran Tasarımı için Stratejiler:

- Dökme, kaplama, çapraz bağlanma ve arayüzey reaksiyonları için daha yeşil çözücü kullanımı
- Yanma ve patlama potansiyelini azaltmak amacıyla düşük toksisitedeki kimyasalların kullanımı
- Membran üretimindeki aşamaları kısaltarak atık miktarının azaltılması
- Doğada kaybolan biyobozunur membran malzemelerinin üretilmesi
- Çözelti hazırlama veya çapraz bağlama sırasında kullanılan enerjinin minimize edilmesi
- Membran üretimi için yenilenebilir malzemelerin veya hammaddelerin kullanımı

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

Desalinasyon amacıyla en yaygın olarak kullanılan membran bazlı teknolojiler, membran distilasyonu (MD), ileri ozmoz (FO), ters ozmoz, kapasitif deiyonizasyon (CDI), pervaporasyon ve genellikle ön arıtma kullanılan mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF) ve nanofiltrasyondur (NF). Membran özellikleri, kimyasal içeriği ve yüzey özellikleri, membranın tuz giderim performansını, kirlenme önleyici özelliklerini ve su geçirimsizliğini etkilemektedir. Günümüzde, hali hazırda büyük ölçekli tesislerde de kullanılan desalinasyon membranların üretiminde sentetik polimerlerin baskın olması büyük bir çevresel yük oluşturmaktadır. Bundan dolayı, kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranları geliştirilmesi ve üretilmesi sırasında sürdürülebilir, toksik olmayan, geri dönüştürülebilir, biyouyumlu, düşük maliyetli ve ekonomik malzemelere yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir.

- Membran üretimi sırasında yeşil polimerlerin kullanılması (biyo-bazlı, biyolojik olarak parçalanabilir petrol bazlı, kompozit)
- Membran üretimi sırasında yeşil çözücülerin kullanılması
- Yeşil polimer/çözücülerin kullanılmasıyla desalinasyon membran üretimi, anti kirlenme özelliklerinin iyileştirilmesi ve bu sayede membran prosesi işletimi sırasında temizleme

sıklığının azaltılarak temizleme esnasında kullanılan toksik yüzey aktif madde, asit, baz gibi kimyasalların azaltılması

- Yeşil polimer/çözücülerin kullanılmasıyla klor direnci yüksek membranların üretilmesi
- Yüksek su geçirgenliğine sahip RO membran üretimi (yeşil nanokompozit, karbon nanotüp (CNC) veya biyomimetik (aquaporin vb.) vb. katkı)
- Desalinasyon için 3D baskılı poliamid membranların geliştirilmesi
- Nanoselüloz/selüloz bazlı desalinasyon membranların geliştirilmesi
- Proses geliştirilmesinde güneş enerjisi, jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi.
- Proses geliştirilmesinde uygun hibrit membran teknolojilerinin değerlendirilmesi
- Proses geliştirilmesinde atık ısı kaynaklarının değerlendirilmesi
- Yeniden kullanılabilir/geri dönüştürülebilir modül tasarımı
- Yaşam döngüsü analizi (LCA) kullanılarak geleneksel yöntemler ile üretilen membranların yeşil desalinasyon membranlar ile karşılaştırılması

Membran bazlı deniz suyu desalinasyon tesislerinin başlıca çevresel etkileri: (fosil yakıt) enerji kullanımıyla ilişkili sera gazı emisyonları, tuzlu suyun kıyı deniz ekosistemi üzerindeki etkileri, deniz kirliliği, kimyasal kullanımı, arazi kullanımı ve malzeme kullanımı. Membran bazlı deniz suyu desalinasyon tesislerinin çevresel etkileri özellikle kullanılan malzeme açısından ele alındığında, kullanılan materyallerin geri dönüştürülebilir olması, yeniden kullanılabilir olması ve biyolojik olarak parçalanabilir olması önem arz etmektedir.

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

Çevre bilinci ve sağlık kaygısı, endüstride ve yaşamı doğrudan etkileyen diğer sektörlerde katı emisyon kontrolü önerilerine yol açmıştır. Küresel sıcaklık artışını durdurmak veya düşürmek için 2050'de sıfır sera gazı emisyon çalışmalarını uygulama gerekliliği doğmuştur. Bu durumda endüstriyel süreçlerde sürdürülebilirlik ve bütünsel bir öngörü gereklidir. Membran teknolojisi, sürdürülebilir kimya ve ilaç endüstrilerinde proses yoğunlaştırmanın yanı sıra sürdürülebilir su arıtma ve yeniden kullanıma yönelik önemli bir araç olma konusunda büyük bir fırsata sahiptir.

Polimerik membranlar, gaz ayırma, sıvı ayırma ve yakıt hücreleri gibi diğer işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu membranları üretmeye yönelik yöntemler ve işlemler genellikle çevreye ve/veya insan sağlığına zararlı etkiye sahiptir. Bu etkileri azaltmak ve alternatif yöntemler bulmak amacıyla birçok yeni malzeme ve sentez yöntemi rapor edilmesine rağmen, yeşil sentez bu çalışmalar içerisinde küçük bir oranı oluşturmaktadır.

Membranların yeşil sentezi için popüler bir strateji de toksik organik çözücülerden kaçınmak veya organik çözücülerini tamamen değiştirerek su kullanımınıdır. Bununla birlikte, rapor edilen birçok yeşil yöntem, yeşil sentezi yalnızca kısmen gerçekleştirmektedir. Nihai hedef, membranları hammaddelerin, membran hazırlamanın, işlem sonrası ve ilgili diğer prosedürlerin tümünün "yeşil" olduğu tamamen çevre dostu bir sentezdir.

Yeşil sentez, membran sentezinde giderek daha önemli hale gelmekle birlikte genel olarak toksik organik çözücülerin su veya toksik olmayan organik çözücüler ile değiştirilmesiyle kısmen elde edilebilmektedir. Tamamen yeşil bir sentezde tehlikeli kimyasalların, reaksiyonların ve süreçlerin kullanımından kaçınılmalıdır. Ayrıca, sentez için kullanılan hammaddeler de yeşil olarak üretilmelidir.

Gereklikler;

1. Güvenli, uzun vadeli bir tedarik kaynağı ile gerekli ölçekte mevcut bulunmalıdır
2. Teknik performans, eşdeğer geleneksel çözücülerden daha kötü olmamalıdır
3. Kullanım ve depolama sırasında kararlı olmalıdır
4. Düşük tutuşma veya tutuşmazlık
5. Rekabetçi fiyat
6. Geri dönüştürülebilirlik
7. Kullanıma uygun saflıkta olmalıdır
8. Kaynak ve enerji verimli üretim (tercihen yaşam döngüsü değerlendirilmeli)
9. Yenilenebilir ara ürünler ve hammadde kaynaklı olmalıdır
11. Biyolojik olarak zararsız ürünlere parçalanabilmelidir.
12. Taşımacılık için standartları ve düzenlemeleri karşılamalıdır

Artan küresel çevre kirliliği endişesiyle birlikte yeşil ve sürdürülebilir sentezin ileriye dönük tek yol olduğu düşünülmektedir. Yapılan çalışmalara bakıldığında ise, polimerik membranların hazırlanması aşamasında yeşil sentez çalışmalarının küçük ölçekli olduğu ve tüm çalışmalar içerisinde küçük bir kısmı oluşturduğu görülmektedir. Bunun yanında, mevcut yeşil stratejilerin çoğu yeşil sentezi ancak kısmi olarak gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle, nihai hedefe ulaşmak için izlenebilecek birkaç yol bulunmaktadır.

- Yeşil sentezin toplam senteze oranını artırılması
- Hazıra yakın (near complete) yeşil sentezin' toplam yeşil senteze oranını artırılması
- Yeşil sentezi tamamen gerçekleştirmek için "yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisinin" uygulanması

- Yeşil kimyasalların ve sentez yöntemlerinin sürekli geliştirilmesi

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Baca gazlarından düşük işletme ve yatırım maliyetlerine haiz karbondioksit ayırma işlemlerinin geliştirme süreci son hızla devam etmektedir. Bu noktada membran ayırma süreçleri ön plana çıkmaktadır; alternatif teknolojiler ile kıyaslandığında, eğer yeterince dayanıklı ve seçici bir membran üretilebilirse ayırma süreci boyunca membran içinde herhangi bir enerji sarfiyatı bulunmayacağından dolayı küresel anlamda karbondioksit tutma maliyetlerinin düşürülmesi yolunda önemli bir çözüm getirilebilir.

Membran prosesleri uzun bir süredir karbon yakalama için araştırılmaktadır. Son zamanlarda ileri malzemelerin geliştirilme çalışmaları için önemli çabalar sarf edilmiştir. Membran süreçleri, karbon yakalama için umut verici olanaklar gösteriyor ancak bugün hala henüz büyük ölçekte olgunlaşmamış bir teknoloji olmasından ötürü ikinci nesil bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Buradaki geçişi gerçekleştirmek için ise büyük ölçekli ekonomik, dayanıklı ve yüksek performansla sahip membranların geliştirilmesi elzemdir.

Membranların potansiyel kullanım alanlarından bir diğeri; biyogaz genellikle kimyasal bir reaksiyon sonucu metan (CH_4) ve karbon dioksitten (CO_2) oluşan ve ayrıca VOC, H_2O , H_2S ve NH_3 içerebilen evsel organik atıkların anaerobik sindiriminden üretilir. Biyogaz, yüksek saflıkta metan varlığı nedeniyle yüksek enerji potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, son kullanıma bağlı olarak, biyogazın ısı değerini artırmak için belirli bir biyogaz arıtımı (yani ham biyogazdan CO_2 uzaklaştırılması olarak tanımlanan biyogaz iyileştirme) yapılmalıdır. Yani biyogaz saflaştırılmasında aşılması gereken temel şey, aynı anda yüksek CH_4 saflığı ve düşük CH_4 kaybı elde etmektir. Bu nedenle, biyogazdan CO_2 'nin düşük bir CH_4 kaybıyla uzaklaştırılması için enerji verimli teknolojiyi belirlemek çok önemlidir.

Güncel biyogaz arındırma işlemlerinde kullanılan teknolojilerin ya verimi düşük ya da yüksek enerji ihtiyacıyla birlikte çok fazla sıvı atık ortaya çıkarmaktadır. Buna karşın, gaz ayırma membran proseslerinin avantajları göz önüne alındığında yine biyogaz arındırma işleminde de kullanılabilen ticari düzeyde membranlara ihtiyaç duyulmaktadır.

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Seramik membran filtrasyonunun günümüzde içme suyu ve atıksu arıtımında, yiyecek-içecek endüstrisi, kimya, ilaç, kağıt, tekstil, deri, petrokimya endüstrilerinde proses sularının ve atıksuların arıtılmasında kullanımı giderek artmaktadır. Bu alanların dışında da termal ve mekanik avantajları nedeni ile polimerik membranların kullanılmadığı alanlarda son yıllarda seramik membran kullanımı önem kazanmıştır. Seramik membranların kimyasal

dayanımlarının yüksek olması, membranların kimyasal temizliklerinin membranların zarar görmeden yüksek kimyasal konsantrasyonlarında yapılabilmesi imkanı vermektedir. Böylece membranlar daha uzun ömürlü kullanılabilir. Seramik membranların mekanik dayanımlarının yüksek olması ile polimerik membranlarda yaşanan bazı dayanıklılık ve işletme problemleri seramik membranlarda daha az seviyede olmaktadır. Ticari membranlar kırılabilir şekilde üretilir. Eğer kırılabilirlik önlenemiyorsa o polimer zaten membran üretiminde kullanılmaz. Seramik membranların polimerik membranlar ile genel olarak karşılaştırılması Tablo 7.2’de verilmiştir.

Seramik membranlar genellikle aktif ayırma tabakasına doğru gözenek boyutu giderek azalan bir altlık ve birden fazla membran tabakasından meydana gelirler. Seramik membranların isimlendirilmesi aktif ayırma tabakasının gözenek boyutu dikkate alınarak yapılmaktadır. Mikrofiltrasyon (MF) seramik membranları makrogözenekli (>50 nm), ultrafiltrasyon (UF) seramik membranları mezogözenekli (2-50 nm), nanofiltrasyon (NF) seramik membranları mikrogözenekli (<2 nm) bir aktif ayırma tabakasına sahiptirler. Bir NF seramik membranı, makrogözenekli (>50 nm) bir altlıktan, altlık üzerine kaplanmış bir ya da birden fazla mezogözenekli (2-50 nm) membran tabakasından ve mezogözenekli membran tabakası üzerine kaplanmış bir mikrogözenekli (<2 nm) aktif ayırma tabakasından oluşmaktadır.

Tablo 7.2. Seramik Membranların Polimerik Membranlarla karşılaştırılması

Seramik Membranlar		Polimerik Membranlar	
Avantaj	Dezavantaj	Avantaj	Dezavantaj
İnorganik malzemelerden yapılmışlardır	Uygulamaları yaygın değildir	Uygulamaları yaygındır	

Kimyasal, termal ve mekanik dirençleri yüksektir	İlk yatırım maliyetleri yüksektir	İlk yatırım maliyetleri çok daha düşüktür	Kimyasal, termal ve mekanik dirençleri düşüktür
Agresif kimyasal temizleme yapılabilir, Rutin temizlenme süreleri daha uzundur		Yüksek basınçta çalışır	Yüksek bazik, düşük asidik ve yüksek sıcaklıklara uygun değildir
Daha uzun kullanım ömrüne sahiptir			Kullanım ömrü kısadır
Kazanım oranı yüksektir			
Daha hidrofilitir			
Yüksek poroziteye sahiptir (daha homojen gözenek dağılımına sahiptir.)			
Düşük işletme basınçlarında yüksek verimlidir			
Kimyasal temizleme ihtiyacı daha azdır			Kimyasal temizlik ihtiyacı çok sıktır
Çevre dostudur			

Seramik membran altlıklar; alümina, zirkonya, titanya, ya da zirkonya-titanya karışımından mezogözenekli membran tabakaları; silika, zirkonya, titanya, alümina ya da bunların karışımlarından, mikrogözenekli membran tabakaları ise genellikle zirkonya, titanya ya da ikisinin karışımından meydana gelebilmektedir. Tübüler seramik membran altlıkların üretiminde ekstrüzyon yöntemi, disk seramik membran altlıkların üretiminde yaygın olarak pres yöntemi kullanılmaktadır. Mezogözenekli membran tabakalarının sentezi koloidal sol-jel, mikrogözenekli membran tabakalarının sentezi polimerik sol-jel yöntemi ile yapılmaktadır. Dünyada ticari olarak yaygın satışı bulunan tübüler seramik membranlar farklı geometrilere,

farklı kanal sayılarına (1, 7, 8, 19, 23, 49 gibi), farklı uzunluklara (250, 580, 850, 1020, 1178 mm gibi), farklı iç kanal çapına (2, 3.4, 3.5, 3.8, 4, 5.6, 6, 7 mm gibi) ve dış çaplara (10, 25, 30, 40, 60 mm gibi) sahip olabilmektedir.

Su kaynaklarının kalitesinin ve miktarının korunması yönünde yapılan çalışmalarda membran teknolojileri öne çıkmaktadır. Yüksek mekanik, kimyasal ve termal dayanımları, polimerik membranlara göre düşük işletme basıncında işletilmeleri, kullanım ömürlerinin uzun olması, permeabilite değerlerinin yüksek olması, kimyasal temizlik ihtiyaçlarının az olması ve polimerik membranlara göre çevreci olmaları nedeniyle seramik membranların tercih edilmesi artmaktadır.

Seramik membran materyeli olarak; alümina, zirkonya, titanya, silika ve diğerleri, uygulamaları alanı olarak; su-atık su arıtımı, yiyecek-içecek, ilaç, biyoteknoloji ve diğerleri, teknoloji olarak mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve diğerleri dikkate alınarak hazırlanan global seramik membran pazar raporlarına göre 2021 yılı için 5.9 Milyar ABD doları olan global seramik membran pazarının 2030 yılında yaklaşık 16 Milyar ABD doları olacağı öngörülmektedir. Global seramik membran pazarının büyümesini sağlayan en önemli sürücü gücün seramik membranların polimerik membranlara kıyasla sahip oldukları avantajları nedeniyle uygulama alanlarının hızla artması ve yiyecek-içecek, ilaç, biyoteknoloji sanayii tarafından da talep edilir hale gelmesi olduğu gösterilmektedir. Global seramik membran pazarının büyümesinin önündeki en önemli kısıt ise üretim maliyetleridir. Seramik membran üretimi için gerekli ilk yatırım maliyetlerinin polimerik membranlara kıyasla yüksek olmasının pazarın büyümesinde kısıtlayıcı olabileceği kaydedilmiştir.

Ülkemizde polimerik membranlarla kıyaslandığında seramik membran konusunda yapılan proje sayısı ve Ar-Ge çalışmaları bile oldukça kısıtlıdır. Ülkemizde seramik membranların ticari olarak üretimi ise yapılamamaktadır. Dünyada laboratuvar ölçeği olarak kabul edilen yaklaşık 40 cm² aktif filtrasyon alanına sahip tek kanallı borsal (tübüler) seramik membranların THS seviyesini yükseltebilmek için gerekli olan ihtiyaçların tespitine, gerekli altyapı ihtiyaçlarının karşılanması ve mevcut ölçekteki çalışmaların büyük ölçeğe aktarılması için Ar-Ge çalışmalarının yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

A. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

Daha önce denenmemiş hammddeler ile ilgili proses geliştirme ve sürdürülebilirlik çalışmaları
THS 3-5

Teknolojik
Hazırlık
Seviyeleri

Dünyada Türkiye’de

THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Yeni nesil alternatif maddelerle membran üretiminde dünyada THS: 7-9

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

Desalinasyon membranların geliştirilmesi THS:7-9

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Proses geliştirilmesinde alternatif enerji kaynaklarının ve atık ısının değerlendirilmesi THS: 5-

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Yeniden kullanılabilir/geri dönüştürülebilir özellikler ve daha önceden çalışılmamış alternatif yeşil malzemelerin kullanımı THS:2-4

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

Yeşil kimyasalların ve sentez yöntemlerinin membran üretiminde kullanımında dünyada THS: 7-9

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Yeşil sentez ve yaşam döngüsü değerlendirme metodolojisinin üretimde uygulanmasında dünyada THS: 4-6

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Verimi yüksek, enerji ihtiyacı düşük, sıvı atığı az membranlar üretiminde dünyada THS: 5-6, Türkiye’de THS 2-3 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Seramik membranların üretimi ve ticari olarak satışı gerçekleştirilmektedir. Dünyada THS: 7-9 düzeyindedir. Türkiye’de tek kanallı ve çok kanallı borsal seramik membran üretiminde THS: 2-4, MF, UF, Fine UF düzeyinde ayırma yapabilen tek kanallı borsal seramik membranların üretiminde THS: 4-5 düzeyindedir.

Tek kanallı ve çok kanallı borsal seramik membran üretiminde THS seviyeleri;

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MF, UF, Fine UF düzeyinde ayırma yapabilen tek kanallı borsal seramik membranların üretiminde THS seviyeleri:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünya’da Çin, Almanya, Fransa, Japonya, ABD, Güney Kore başta olmak üzere sadece belli başlı ülkelerde seramik membranların ticari olarak satışı gerçekleştirilmektedir.

Seramik membranlar geometrilerine göre farklılıklar göstermektedir, ticari olarak satışı yapılanlar borsal (tübüler) tip membranlardır. Bu tip membranların tek kanallı ve birden çok kanallı seçenekleri bulunmaktadır. Ülkemizde çok kanallı borsal seramik membran üretimi

bulunmamaktadır. Tek kanallı borsal seramik membranlar ise laboratuvar ölçeğinde ve sınırlı sayıda, uzun süreçlerle üretilmektedir. Laboratuvar ölçekli tek kanallı borsal seramik membranların üretim miktarını arttırmak, üretim süresini kısaltmak ve çok kanallı seramik membranların öncelikli olarak laboratuvar ölçeğinde geliştirilmesi ciddi bir alt yapı yatırımı ve Ar-Ge yatırımı gerektirmektedir. SERAMİK Araştırma Merkezi A.Ş.'de dahil olunan UFUK 2020 projesi kapsamında atık seramikten düz tabaka MBR seramik membranları üretilmiş ancak ticari boyuta geçememiştir. 2015-2019 yıllarında yürütülen TÜBİTAK 1003 proje çıktısı olarak MF, UF, Fine UF düzeyinde ayırma yapabilen THS 4-5 olan tek kanallı borsal seramik membranların laboratuvar ölçeğinde üretimi TÜBİTAK MAM'da gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçeğinde arıtma kapasitesine sahip olan, kısıtlı sayıda ve uzun süreçler ile üretilen bu tek kanallı seramik membranların üretim koşullarının iyileştirilmesine yönelik altyapı yatırımlarının yapılması daha sonra pilot ve büyük ölçekli arıtma kapasitesine sahip çok kanallı borsal seramik membranların geliştirilmesi için çalışılması faydalı olacaktır. Bu alanda sağlanacak gelişmeler, borsal seramik membranların tekstil, kimya, yiyecek-içecek, ilaç, biyoteknoloji gibi farklı endüstrilerde ve arıtılmış su eldesi, hammadde geri kazanma, saflaştırma, gaz ayırma, biyolojik ajanların giderilmesi gibi farklı uygulamalar için kullanılmasının önünü açacaktır.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

Dünyada THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) (Suudi Arabistan), KU Leuven (Belçika), Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR) (Hindistan), Islamic Azad University (İran), Nanjing Tech University (Çin) vs.

Türkiye'de THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ), Yalova Üniversitesi vs.

Dünya örnekleri: Danimarka'da yer alan Aquaporin adlı firma aquaporin proteini içeren biomimetik içme suyu membranları, kuyu suyu RO membranları, hollow fiber ileri osmoz membranları üretmektedir.

Türkiye örnekleri: Türkiye'de alternatif hammaddelerle membran geliştirme konusunda herhangi bir girişim örneğine rastlanmamıştır. Ancak membran üretimi üzerine yetkin üniversite ve Ar-Ge merkezleri (İTÜ, MEMTEK, TUBİTAK MAM vd.) bulunmaktadır. Bu konunun

desteklenmesi halinde mevcut altyapılarla alternatif hammaddeler üzerine çalışmalar planlanabilir.

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: Calabria Üniversitesi (İtalya), Northumbria Üniversitesi (İngiltere), Kobe Üniversitesi (Japonya), Middle Technical University (Irak), KU Leuven (Belçika), Islamic Azad University (İran), Nanjing Tech University (Çin) vd.

THS 6-9: Prototip Geliştirme, Ürünleşme ve Ticarileşme

THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: İTÜ, ODTÜ, Yalova Üniversitesi vd.

Dünya örnekleri: Danimarka'da yer alan Aquaporin adlı firma aquaporin proteini içeren biomimetik içme suyu membranları, kuyu suyu RO membranları, hollow fiber ileri osmoz membranları üretmektedir.

Türkiye'de (varsa) başarılı örnek ve girişimler: Bu konunun desteklenmesi halinde membran üretimi üzerine yetkin üniversite ve Ar-Ge merkezleri (İTÜ, MEMTEK, TUBİTAK MAM vd.) tarafından çalışmaların yapılabileceği öngörülmektedir.

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

THS 6-9: Prototip Geliştirme, Ürünleşme ve Ticarileşme

Vertec Biosolvents, biyo esaslı ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen güvenilir solvent ve katkı maddeleri içeren taşıyıcı veya temizleyici yüksek performanslı solvent karışımları sunmaktadır.

Liberty Chemicals, Astrobio ticari isimli yeşil solvent ile farklı uygulama alanlarında kullanım sağlamaktadır.

Türkiye'de bu konuda çalışmaya rastlanmamıştır.

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Membran süreçleri, biyogaz saflaştırma (örn. Evonik SEPURAN Green) için THS 9 seviyesinde halihazırda kullanılmaktadır. Buradaki teknolojinin olgunlaşabilmesinin temel sebebi bu

prosesin kapasitelerin ve gaz içeriğinin nispeten temiz ve düşük olmasındandır. Ancak baca gazı emisyonları için en yüksek THS seviyesi 5 olarak gözükmemektedir.

Baca gazından karbondioksit ayırma süreçleri için ise, YODFAT ENGINEERS firması EU destekli bir proje kapsamında Norveç'teki bir çimento fabrikasının emisyonuna dair bu yıl başında THS 5 seviyesinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada 200 Nm³/saat %6-8 CO₂ içeren baca gazı 2 kademeli membran ayırma prosesinde %80-90 CO₂ saflığına kadar başarıyla ayrıştırılmıştır.

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Dünya'da yüksek aktif membran filtrasyon alanına sahip, çok kanallı, farklı geometrilerde, MF, UF, Fine UF/NF düzeyinde ayırma yapabilen seramik membran üretiminde THS 9 seviyesinde bulunan belli başlı ticari firmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları Atech (Almanya), PaLL Corporation (ABD), TAMI (Fransa), Novasep (Fransa), Guochu (Çin) ve Metawater (Japonya) olarak sıralanabilir.

Türkiye'de tek kanallı, 40 cm² aktif membran filtrasyon alanına sahip MF, UF, Fine UF/NF düzeyinde ayırma yapabilen tübüler seramik membranlar THS 4-5 seviyesindedir.

Dünyadaki başarılı girişimler ve örnekler: Fraunhofer IKTS (Institute for Ceramic Technologies and Systems) seramik teknolojilerini, seramik membranları da içine dahil ederek en kapsamlı ve çok yönlü (geliştirme, ölçek büyütme, sanayi ile ortak uygulamalar) olarak çalışan dünyadaki en iyi örneklerden biridir. Çin, Almanya, Japonya, Fransa, ABD, Güney Kore bu alanda iyi örneklerle sahip öncü ülkeler arasındadır.

Türkiye'de bu konuda başarılı örnek ve girişimler daha sınırlıdır ve konu gelişmeye açık alanlar arasındadır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

Kimya Mühendisliği, Çevre Mühendisliği, Biyoteknoloji, Biyomühendislik, Kimya, Polimer Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği disiplinlerinden kişiler biraraya gelmelidir.

Polimer ve çözücü üretimine yönelik büyük ölçekli sanayi kuruluşların, KOBİ'lerin, üniversitelerin, kamu araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketlerinin birarada çalışması gerekmektedir.

Üniversite-Sanayi işbirliği kapsamında üniversitede gerçekleştirilecek yüksek lisans-doktora veya AR-GE çalışmaları ile laboratuvar ölçekli çalışmaların gerçekleştirilmesi, sanayi iş birliği ile pilot ölçekli çalışmaların yaygınlaşması, hem sanayi kuruluşlarından hem de ulusal kamu ve/veya uluslararası araştırma fonlarından alınacak destek ile pilot çalışmaların artırılması ve uzun vadede gerçek ölçekli çalışmalara geçilmesi.

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

Kimya Mühendisliği, Çevre Mühendisliği, Biyoteknoloji, Biyomühendislik, Kimya, Polimer Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği disiplinlerinden kişiler biraraya gelmelidir.

Polimer ve çözücü üretimine yönelik büyük ölçekli sanayi kuruluşların, KOBİ'lerin, üniversitelerin, kamu araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketlerinin birarada çalışması gerekmektedir.

Üniversite-Sanayi işbirliği kapsamında üniversitede gerçekleştirilecek yüksek lisans-doktora veya AR-GE çalışmaları ile laboratuvar ölçekli çalışmaların gerçekleştirilmesi, sanayi iş birliği ile pilot ölçekli çalışmaların yaygınlaşması, hem sanayi kuruluşlarından hem de ulusal kamu ve/veya uluslararası araştırma fonlarından alınacak destek ile pilot çalışmaların artırılması ve uzun vadede gerçek ölçekli çalışmalara geçilmesi.

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

- Kimya, Kimya Mühendisliği, Polimer ve Malzeme Mühendisliği, Proses Mühendisliği disiplinlerinden kişiler bir araya gelmelidir.
- Büyük ölçekli sanayi kuruluşların, KOBİ'lerin, üniversitelerin, kamu kurumlarının, kamu araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketlerinin bir araya gelmesiyle bir konsorsiyum oluşturulması gerekmektedir.
- Yüksek lisans ve doktora çalışmalarında sanayi kuruluşları ile birlikte çalışılarak giderilmesi gereken eksiklikler ve geliştirmeler üzerinde çalışılmalı ve üniversite-sanayi iş birliği sağlanmalıdır.
- Uluslararası araştırma programlarına (Cost, Horizon vb.) proje önerileri verilmeli ve yurtiçi/yurtdışı ortaklıklar kurulmalıdır.

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Baca gazına entegre membran teknolojisi henüz olgunlaşmamış olduğu için özel sektör ve kamu kurumları bir arada çalışmalıdır, bununla birlikte farklı disiplinlerin de bir arada çalışması gerekmektedir. Belirtilen sorunların çözümüne yönelik, Fizik, Kimya, Kimya Mühendisliği ve Malzeme Biliminde uzman kişiler bir arada çalışmalı, proses mühendisleri bu çıktıları sahaya entegre etmelidir. Bu kişiler mevcut teknolojiyi en ileride takip edebilen, son gelişmelerden haberdar ve bunların uygulamasında bir miktar tecrübe sahibi olmalıdır. Bu sayede en yüksek verimli malzeme geliştirilirken bu malzemelerin proses üzerindeki etkisi de incelenebilir.

Özellikle yüksek emisyon miktarlarına sahip olan ve biyogaz üretimi yapan firmalar desteğiyle destek havuzu oluşturmak, bu teknolojin ülkemizde geliştirilmesinin önünü açabilir. Bu şekilde oluşturulan havuzdan, membran teknolojisi bu havuzdaki firmalara uygulanabilir hale getirilmeli ve firmalara potansiyel gelecek karbon vergilerine karşı avantaj sağlamalıdır.

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Kimya, Kimya Mühendisliği, Malzeme Mühendisliği, Seramik Mühendisliği, Çevre Mühendisliği disiplinlerinden uzmanlar birarada bulunmalıdır.

Ar-Ge çalışmaları için üniversitelerin ve kamu araştırma merkezlerinin, gereklilikleri belirlemek ve destek mekanizmalarını sağlamak için ilgili kamu kuruluşlarının ve seramik membranlar ile atık su arıtımına ihtiyaç duyan metal, tekstil, kimya gibi sektörlerin bir arada çalışması gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

7.1.a ve 7.1.b için

Türkiye’de bu konularla ilgili araştırmalar için bir envanter çalışması başlatılması gerekmektedir. Söz konusu konular ile ilgili öncelikli olarak ulusal durumun değerlendirilmesi için bir ulusal envanter raporu hazırlanmalıdır. Bu doğrultuda eksik yanlar, desteklenmesi gereken alanlar ve bütçeler belirlenmelidir ve bu alanlardaki çalışmalar ihtiyaçlar doğrultusunda desteklenmelidir. Benzer konularda yapılan çalışmalar aynı platform kapsamında gerçekleştirilerek sinerjik işbirliği sağlanmalıdır. Bu platformların sonuçları ilgili endüstri kolunda tanıtılmalı ve sanayi işbirliği yapılarak teknolojik hazırlık seviyeleri artırılarak

ürün geliştirme ve prototip çalışmalarına geçilmelidir. Küçük bireysel çalışmalara nazaran bu çalışmaların bir platformda beraber çalışılmasının daha verimli olacağı düşünülmektedir.

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

- Kimya ve plastik endüstrilerinde önde gelen küresel şirketler,
- Sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmek amacıyla endüstriyel kullanıcılar,
- Güçlü satın alma gücüne ve yüksek derecede çevre bilincine sahip tüketiciler,
- Sürdürülebilir kalkınmayı ve uyumlu yenilikleri aktif olarak destekleyen seçilmiş yasal ve düzenleyici çerçeveler altında işbirlikleri yapılabilir.

Üniversite-sanayi iş birliği modelleri

Kamu özel iş birliği modeli,

Küçük/orta/büyük ölçekli çalışmalar için düzenlenen iş paketleri alt yükleniciler arasında paylaştırılarak, sanayi kuruluşları, KOBİ'ler, üniversiteler, kamu kurum ve kuruluşları ve araştırma merkezlerinin ve teknopark şirketleri arasında iş birlikleri sağlanmalıdır.

Yüksek lisans ve doktora çalışmalarında sanayi kuruluşları ile birlikte çalışılarak giderilmesi gereken eksiklikler ve geliştirmeler üzerinde çalışılmalı ve üniversite-sanayi iş birliği sağlanmalıdır. Ülke stratejileri göz önüne alınarak belirlenen öncelikli alanlarda projeler hayata geçirilmelidir.

Özellikle uluslararası araştırma programlarına (Cost, Horizon vb.) proje önerileri verilmeli ve yurtiçi/yurtdışı ortaklıklar kurulmalıdır.

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Bir disiplin sürekli deneyler gerçekleştirirken, diğer bir disiplin bu deneylere ait simülasyonları gerçekleştirebilmeli, yorumlar getirebilmeli ve en iyi koşulları önerebilmek amacıyla sürekli iletişim halinde çalışmalıdır. Bu şekilde deney, test ve analiz alt yapısı olan işbirlikçileri yalnızca bu işe odaklanıp olabildiğince fazla bilgi toplarken bu bilgilerin kullanılacağı başka bir işbirlikçi de paralelde bu bilgileri işleyerek, bilgi toplama ve yorumlama arasındaki zaman kaybı engellenebilmelidir.

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Müşteri kuruluşların, teknoloji sağlayıcı olarak en az bir KOBİ statüsündeki şirket, bu konuda tecrübeli en az bir üniversite araştırma laboratuvarı/merkezi ya da kamu araştırma merkezi/enstitüsü ve TÜBİTAK Enstitüleri ile konsorsiyum oluşturmaları işbirliği modelinde çağrılar da bu alanda ilerleme sağlayabilecek teşviklerdir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

7.1.a. Alternatif hammaddelerle sürdürülebilir membran proseslerinin tasarlanması

7.1.b. Kimyasalların üretiminde çeşitli proseslerde deniz suyu kullanımına yönelik desalinasyon membranlarının geliştirilmesi ve üretilmesi

7.1.c. Solventlerin 3R (Reduce, Reuse, Recycle) prensibine göre kullanımı ve/veya alternatif yeşil solventlerin kullanımına yönelik membran proseslerinin geliştirilmesi

7.1.a-7.1.c maddeleri için öncelikle zaman ve bütçelere karar verilebilmesi için Türkiye'deki mevcut durumun tanımlanması ve seviyelerin belirlenmesi gerekmektedir. Eksik alanların belirlenmesi, kuvvetli zayıf yönlerin tespiti ve bu eksikliklere göre zaman ve bütçe planlamasının yapılması gerekmektedir.

Membran üretimi çalışmaları için 1-3 yıl, pilot ölçekli çalışmalar için 3-5 yıl. Gerçek ölçekli çalışmalara ulaşılabilmesi için ilk olarak laboratuvar ölçekli ve pilot ölçekli kritik ürün/teknoloji çalışmalar üzerine yoğunlaşılması gerekmektedir. Kritik ürün/teknoloji ön çalışmaları kısa vadede, büyük ölçekli çalışmalar uzun vadede hedeflenmelidir.

7.1.d. Baca gazından ve biyogazdan karbondioksit ayıran membranların geliştirilmesi

Membran ile biyogazdan karbondioksiti ayırma süreçlerinin THS 9 seviyesinde olduğu düşünüldüğünde, kısa vadeli çağrılara çıkılarak bu membranları üretilen yerli firmaların oluşmasına imkân sağlanmalıdır. Öte yandan baca gazları yolunda orta ve uzun vadeli çağrılar zaman planlamalarına uygun olarak belirlenmelidir. Ayrılması gereken bütçeler de mevcutta bulunan pilot sahaların kurulum maliyetlerinden esinlenerek belirlenmelidir.

7.1.e. Seramik membranların geliştirilmesi

Seramik membranların geliştirilmesinin ve pilot ölçekli çalışmaların kısa-orta vadede (1-5 yıl), ölçek büyütme faaliyetlerinin uzun vadede (>5 yıl) gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir. Gerçek

ölçekli çalışmalara ulaşılabilmesi için ilk olarak laboratuvar ölçekli ve pilot ölçekli kritik ürün/teknoloji çalışmaları üzerine yoğunlaşılması gerekmektedir. Kritik ürün/teknoloji ön çalışmaları kısa vadede, büyük ölçekli çalışmalar uzun vadede hedeflenmelidir. Bütçenin ortalama düzeyi söylenemese de alt sınırının 200-250 Milyon TL'nin altına düşmemesi önem arz etmektedir. Bütçe tahminleri için ihtiyaçların tespit edilmesinin gerekliliği vardır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamunun atması hususlar	adım gereken	Teknolojik ilerlemenin sağlanması için öncelikle ihtiyaç duyulan altyapının tespiti, temini ve Ar-Ge için fon sağlanması en önemli husustur. Kimyasal, makine ve teçhizat temini oldukça uzun süreler almakta maliyetleri ise gümrük vergisi, ara komisyonlar nedeni ile yurt dışına göre oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle Ar-Ge amacı ile kullanılacak sarf malzemesi ve makine teçhizat için doğrudan alım ve vergi muafiyetleri Türkiye'deki Ar-Ge çalışmalarını rekabet gücünü artıracak önemli hususlar olarak öne çıkmaktadır.
Mevzuat ve düzenlemeler	yasal	<ul style="list-style-type: none">• Standartların erişime açık hale getirilmesi,• Fikri mülkiyet hakları konusunda yapılabilecek düzenlemeler,• Patent desteklerinin artırılması,• Patent başvuru ve kabul aşamalarındaki prosedürlerin kısaltılması• Teknoloji transfer yönetmeliklerinin incelenmesi ve süreçlerde hız kazanılması
Teknik Altyapılar		<p>Biyo esaslı polimer sentezine yönelik altyapıların geliştirilmesi gerekmektedir. Elde edilen biyopolimerin laboratuvar ölçekte membran üretiminde kullanımına yönelik membran üretim alt yapıları, karakterizasyonu üniversiteler ve Ar- Ge merkezlerinde bulunmaktadır.</p> <p>Ticarileşme yolunda sertifikasyon merkezleri oluşturulmalıdır.</p> <p>Ülkemizde bulunan, UME ve TÜRKAK gibi kuruluşlardan sertifikasyon hizmeti alınabilmektedir. İhtiyaç halinde uluslararası geçerliliği olan sertifikasyonlar temin edilmelidir.</p>

	<p>Üretim ve test altyapıları seramik membran geliştirmek için yetersizdir. Dünyadaki seramik membran geliştirilmesine ve üretilmesine yönelik uzmanlaşmış araştırma merkezleri dikkate alınarak tespit edilecek ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak kapsamlı bir altyapı yatırımı yapılması gereklidir.</p>
<p>İnsan Kaynakları (İlgili yetkinlikte kalifiye eleman, ara teknik eleman, vb.)</p>	<p>Ülkemizdeki üniversite altyapıları ve lisans seviyesindeki bölümlerde, Araştırma Merkezlerinde ve sanayide konu ile ilgili insan kaynağı açısından bir kısıt bulunmamaktadır. Bunların yanında, uzmanlık kazanılması ve yetkinliklerinin artırılması amacıyla ilgili konularda çağrılara çıkılabilir, motivasyon amaçlı başarı bursları sağlanabilir ve/ veya sanayi iş birlikleri ile çalışma hayatına kazandırılarak istihdam sağlanabilir. Bu gibi önemli çalışmalar ile alandaki yetkin insan kaynağı sayısı artırılabilir ve ticari ürüne geçiş hızlanabilir.</p> <p>Ekonomik ve akademik teşviklerin seramik membran üretimi için doğru kurgulanması durumunda yeterli insan kaynağı mevcuttur.</p>
<p>Teşvik ve Destekler</p>	<p>Hedeflenen ilerlemenin sağlanması için büyük bütçeli altyapı yatırımlarına ve beraberinde Ar-ge desteğine imkan tanıyacak teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır.</p> <p>Çeşitli teşvik programları ile (TEYDEB, hibe, uzun vadeli kredi vs) geliştirilecek ürünlerin ticarleştirilmesine katkı sunulabilir.</p> <p>Girişimcilik konuları desteklenebilir.</p> <p>Öncelikli konularda desteklenen projelerde destek amaçlı vergi indirimleri yapılabilir.</p> <p>Proje çalışanlarındaki proje teşvik ikramiye oranları artırılabilir.</p> <p>Altyapı, bakım onarım ve teçhizat destekleri artırılmalıdır.</p>

KAYNAKLAR

N. Winterton, "The green solvent: a critical perspective," Clean Technol. Environ. policy, vol. 23, no. 9, pp. 2499–2522, 2021.

X. He, "A review of material development in the field of carbon capture and the application of membrane-based processes in power plants and energy-intensive industries," Energy. Sustain. Soc., vol. 8, no. 1, pp. 1–14, 2018.

- M. S. Shin, K.-H. Jung, J.-H. Kwag, and Y.-W. Jeon, "Biogas separation using a membrane gas separator: Focus on CO₂ upgrading without CH₄ loss," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 129, pp. 348–358, 2019.
- N. Abid, F. Ceci, and M. Ikram, "Green growth and sustainable development: dynamic linkage between technological innovation, ISO 14001, and environmental challenges," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 17, pp. 25428–25447, 2022.
- D. Kim and S. P. Nunes, "Green solvents for membrane manufacture: Recent trends and perspectives," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 28, p. 100427, 2021.
- S. Jiang and B. P. Ladewig, "Green synthesis of polymeric membranes: recent advances and future prospects," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 21, pp. 1–8, 2020.
- S. A. N. Mehrabani, V. Vatanpour, and I. Koyuncu, "Green solvents in polymeric membrane fabrication: A review," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 298, p. 121691, 2022.
- S. Jiang and B. P. Ladewig, "Green synthesis of polymeric membranes: recent advances and future prospects," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 21, pp. 1–8, 2020.
- A. J. Jose, J. Kappen, and M. Alagar, "Polymeric membranes: Classification, preparation, structure physiochemical, and transport mechanisms," in *Fundamental Biomaterials: Polymers*, Elsevier, 2018, pp. 21–35.
- H. Lin and Y. Ding, "Polymeric membranes: chemistry, physics, and applications," *Journal of Polymer Science*, vol. 58, no. 18. Wiley Online Library, pp. 2433–2434, 2020.
- L. M. Robeson, "Polymer membranes," 2012.
- M. T. Ravanchi and A. Kargari, "New advances in membrane technology," in *Advanced technologies*, IntechOpen, 2009.
- M. Ulbricht, "Advanced functional polymer membranes," *Polymer (Guildf.)*, vol. 47, no. 7, pp. 2217–2262, 2006.
- E. Drioli, A. I. Stankiewicz, and F. Macedonio, "Membrane engineering in process intensification—An overview," *J. Memb. Sci.*, vol. 380, no. 1–2, pp. 1–8, 2011.

Kritik Ürün/Teknoloji 7.2.

7.2. Yeni adsorban/adsorbent üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak biyobazlı adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi

7.2.b. Suların ileri arıtılmasında kullanılacak biyobazlı karbon adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik biyobazlı karbon adsorbentlerin geliştirilmesi ve üretimi

Kritik Ürün/Teknoloji 7.2.

7.2. Yeni adsorban/adsorbent üretimi ve kullanımına yönelik teknolojiler

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Avrupa Komisyonu'nun atık istatistiklerine göre, kömür endüstrisi (madencilik ve enerji faaliyetleri), tarım endüstrisi, su arıtma ve ev sektörü ile ilgili toplamda 19 faaliyet, büyük miktarlarda katı atık üretimi ve birikimi ile ilişkilidir. Toplanan atık miktarının artmasıyla bağlantılı artan çevresel kaygıları en aza indirmek için, çok sayıda araştırma faaliyeti, bol miktarda atık malzemeden elde edilen katma değerli ürünlerin hazırlanması da dahil olmak üzere yeni atık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Adsorpsiyon birçok alanda uzun zamandır başarıyla uygulanan bir ayırma/safılaştırma yöntemidir. Günümüzde en yaygın tercih edildiği alanlar şöyle örneklenebilir: hidrojenin saflaştırılması, gaz ve sıvı dehidrasyon, hava ayırma, çöp depo sahası gazı iyileştirilmesi, izomer ayrımları, CO geri kazanımı, kirleticilerin giderilmesi (SO_x , NO_x , organik kükürt, siyanürler, asit buharları, ağır metaller ve VOC'ler), su/atıksu arıtma, biyo-kimyasal ve farmasötik üretimi, CO_2 emisyonlarının azaltılması ve verimliliğin iyileştirilmesi. Adsorpsiyon işlemini uygulayan sistemin üç ana unsuru olan adsorban madde, adsorplanan bileşen ve taşıyıcı ortam ile ilgili parametreler adsorpsiyon işleminin performansını ve uygulanabilirliğini etkileyen faktörlerdir. Bu sebeple bu üç sistem bileşeninden herhangi birindeki değişimin veya modifikasyonun proses performansı üzerine olumlu veya olumsuz etkilerinin bilinmesi ve gerektiğinde performans artırıcı düzenlemelerin yapılabilmesi bu prosesin uygulanabilirliğini ve teknoloji hazırlık seviyesini artıran önemli faktörlerdir.

Etkili bir adsorpsiyon prosesi için, kullanılacak adsorbandan beklenen kritik özellikler aşağıda listelenmiştir:

- Geniş yüzey alanı
- Yüksek yüzey alanı/hacim oranı
- Yüksek adsorpsiyon performansı
- Yüksek çevrimsel kararlılık
- Yüksek seçicilik
- Yüksek mekanik, kimyasal ve termal kararlılık
- Üzerindeki aktif noktaların fazla olması

- Yoğunluğunun düşük olması
- Çevreye zararsız malzemelerden oluşması / Çevre dostu ve enerji etkin malzemelerden oluşması
- Geri kazanılabilir olması ve/veya biyo- bozunur olması ve/veya çevrimsel kararlılığının yüksek olması (tekrar tekrar kullanılabilmesi)
- Üretim ve uygulama maliyetinin nispeten düşük olması

Ayrıca laboratuvar, pilot veya gerçek ölçekli uygulamalarda maliyet düşürücü, verim artırıcı, sürdürülebilir çözümlerin ve karşılaşılan sıkıntıları giderici önlemlerin sistemin teknolojisine ve sürece yansıtılmasının beraberinde rejenerasyon ile kullanılmış adsorbanlara yönelik düşük karbonlu, nihai uzaklaştırma çözümleri sistemi daha yüksek düzeyde uygulanabilir kılacaktır.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorbanların ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Günümüzde mevcut enerji talebinin çoğunluğu yenilenemez niteliğe fosil yakıt bazlı santrallerden elde edilmektedir, ancak sürdürülebilirlik sağlamak için bu enerji kaynaklarının daha etkin ve verimli kullanımı önem arz etmektedir. Sentez gazı ve hidrojen üretimi, verimli ve çevreye duyarlı teknolojiler olarak dünya çapında önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Yüksek saflıkta hidrojen üretiminin yanı sıra metanol veya sentetik yakıt gibi yüksek değerli ürünlere de dönüştürülebilen sentez gazını saflaştırmanın etkili yollarının araştırılması önem taşımaktadır. Sentez gazının, kaynağına bağlı olarak içerdiği karbon dioksit, nitrojen, metan, etan, etilen, hidrojen sülfür, amonyak ve su gibi çeşitli safsızlıkları gidermek ve/veya bileşimini istenen değerlere ayarlamak için endüstride absorpsiyon, adsorpsiyon ve membran gibi birçok ayırma metodu kullanılmaktadır. Bu metotlardan adsorpsiyon prosesi, (basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) ve sıcaklık salınımlı adsorpsiyon (TSA)) daha düşük enerji kullanımı gerektirmesiyle öne çıkmaktadır. Adsorbanın kullanıldığı prosesler de adsorbanla birlikte geliştirilmeli ve optimize edilmelidir.

Proses/sistem optimizasyonu konusunda ürün/teknoloji ihtiyaçları:

- Adsorpsiyon sistemi için enerji kullanımı, kimyasal kullanımı, bakım ve işçilik gereksinimleri, proses atıkları, yatırım ve işletme maliyetinin optimize edilmesi
- Sürekli sistemlerde proses bazında temas süresi, hidrolik yükleme, kontaminant yükleme, kolon ömrü, işletme koşulları (sıcaklık, pH, basınç vb) optimizasyonu rejenerasyon ve kullanım sonrası adsorban değerlendirme optimizasyonu
- Gerçek ölçekli sistem tasarımı, proses konfigürasyonları optimizasyonu

Alternatif adsorbanlar konusunda ürün/teknoloji ihtiyaçları:

Adsorban maddelerin performansları ve sektörel tercih edilebilirlikleri maliyet verimliliği, proses verimliliği, eko-verimlilik, erişim kolaylığı, sürdürülebilirlik, döngüsellik ana başlıkları altında değerlendirilebilir. Bu kapsamda Ar-Ge unsurları şöyle sıralanabilir:

- Hammaddesi düşük maliyetli, yerli ve/veya farklı kaynaklardan kolay temin edilebilen adsorbanlar geliştirilmesi
- Sürdürülebilir, tekrar tekrar kullanılabilir adsorbanlar üretilmesi
- Düşük değerli atık malzemeden veya endüstriyel yan ürünlerden yüksek değerli adsorban üretilmesi (upcycling)
- Adsorban olarak atık malzemelerin kullanılması ile CO₂ yakalama sürecinin hem çevresel hem ekonomik maliyetini azaltacak yöntemler geliştirilmesi
- Adsorban üretiminde maliyeti ve enerji tüketimi düşük, verimliliği yüksek fiziksel, kimyasal (asit, alkali, oksidan, metal tuzları, diğerleri ile) aktivasyon, impregnasyon ve modifikasyon metotları geliştirilmesi.
- Adsorban üretiminde hammadde olarak kullanılmak üzere sürdürülebilir gözenekli karbon materyallerin termokimyasal süreçlerle eldesi (Hidrotermal karbonizasyon, Torefikasyon (kavurma), Flaş karbonizasyon, Piroliz, Gazlaştırma).
- Optimize edilmiş özelliklere sahip Hibrit kompozitlerin (biyo-nano, organik-inorganik vb) geliştirilmesi ve adsorban olarak etkinliklerinin belirlenmesi
- Daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek verimde ve saflıkta sentez gazı eldesi sağlayabilecek adsorbanların geliştirilmesi, bu uygulamanın gerçek ölçekte yapılabileceği sistemlerin tasarımı ve üretimi
- Sentez gazı saflaştırmada akışkan fazda yer alan tar bileşenler sebebiyle aktif karbonda tam rejenerasyon sağlanamaması probleminin çözülmesi (İşletme deneyimleri, daha ağır katranların (tar) 160°C'lik buhar sıcaklığından daha yüksek kaynama noktası sergilemesi nedeniyle AC'nin tam olarak rejenere edilemeyeceğini göstermiştir (benzen için kaynama noktası 80°C'dir ve örneğin naftalin için 218°C'dir))
- Yanma sonrası N₂, CO₂ ve H₂O içerikli gazdan CO₂ yakalama için yenilikçi yöntem geliştirilmesi veya mevcut işlemlere uyarlanabilecek modifikasyonların belirlenmesi ve sistemin farklı ölçeklerde tasarlanması
- Rejenerasyon yöntemlerinin adsorban yüzeyindeki fonksiyonel gruplarla ve buna dayalı olan kontaminant giderim mekanizmasıyla ilişkilendirilmesi
- Döngüsellüğün sağlanması, rejenerasyon atıklarının değerlendirilmesi, kullanım ömrünü tamamlamış adsorbanların başka alanlarda verimli değerlendirme veya verimli nihai uzaklaştırma yöntem ve yaklaşımlarının geliştirilmesi

- Adsorban rejenerasyonunda adsorban ve adsorbat maddeye göre uygun bozundurma (oksidasyon, elektrokimyasal, ultrasonik, mikrobiyolojik vb) veya desorpsiyon (termal, termal olmayan) yöntem ve uygulama teknolojisinin geliştirilmesi

7.2.b. Su ve atıksuların ileri arıtılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorbanların ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünyadaki toplam suyun %1'inden daha azı nehirlerden, göllerden, kuyulardan veya göletlerden tatlı su olarak erişilebilir veya tüketilebilir durumdadır. İnsan faaliyetleri doğal kaynakları doğrudan ve/veya dolaylı olarak önemli ölçüde kirletmekte ve bu durum küresel temiz su kıtlığı sorununu doğurmaktadır. Organik ve inorganik kirleticilerin su kütlelerine karışmasını önlemek için su/atıksuyun ileri arıtımında adsorpsiyon, fotokataliz, fotoelektrokataliz, ters ozmoz, membran ayırma, flokülasyon, biyolojik çökeltme, elektrokimyasal prosesler, iyon değişimi ve tuzdan arındırma gibi teknikler kullanılmaktadır. Nutrientler gibi çözülmüş kirletici parametrelerin, özellikle de günümüzde daha fazla dikkat çeken mikrokirleticilerin su ve atıksudan ayrıştırılmasında tanımlanan en etkili yöntemler arasında AC adsorpsiyonu yer almaktadır. Su ve atıksulardan kirlilik uzaklaştırmak amacı ile hem bilimsel çalışmalarda hem de pratik uygulamalarda kullanılan adsorbanlar, inorganik (Metal oksitler, çift katmanlı hidroksitler (LDH'ler), silika, killer ve MOF'lar (Metal organik çerçeveler)) ve organik (aktif karbon (AC), biyo-kömür, biyokütleden üretilen polisakkaritler, grafen, karbon nano tüpler (CNT), polimerler ve iyon değiştirici reçineler) olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Bunların modifikasyonu ile kapasite artışı sağlanan adsorbanlar da mevcuttur. Karbon bazlı nanomalzemeler su arıtımı için nanoadsorbanlar olarak popülerlik kazanmaktadır. Ayrıca, inorganik ve organik endüstriyel yan ürünlerin de (uçucu kül, organik çamur, kırmızı çamur gibi) adsorban olarak doğrudan veya bir işleme tabi tutularak kullanımı mümkündür.

Adsorban maddelerin performansları ve sektörel tercih edilebilirlikleri maliyet verimliliği, proses verimliliği, eko-verimlilik, erişim kolaylığı, sürdürülebilirlik, döngüsellik ana başlıkları altında değerlendirilebilir. Genel olarak sürdürülebilir adsorbanların (ucuz ve çevre dostu) geliştirilmesi ve üretimi halen literatürde çok yer alan ve gelişmeye açık bir konudur. Ayrıca, adsorbanların daha yaygın kullanımını kısıtlayan kullanılmış adsorban yönetimi (rejenerasyon, geri kazanım, tekrar kullanım, depolama vs) konusu da problemli alanlardan birisidir. Adsorpsiyon araştırmalarında çoklu kirletici varlığında kirleticilerin seçici olarak uzaklaştırılması önem taşımaktadır. Adsorbanın rejenerasyonu, işletme maliyetini azaltmak, ikincil atık oluşumunu önlemek ve tutulan maddenin geri kazanımı için önemlidir. Bu amaca ulaşmak için, uygun rejenerasyon yöntemleri, optimum rejenerasyon süresi, rejenerasyon işlemi sırasında malzemenin stabilitesi ve rejenerasyon edilmiş adsorbanların tekrarlanabilirlik performansı gibi bazı

önemli rejenerasyon parametreleri ayrıntılı olarak incelenmelidir. Adsorpsiyon çalışmalarının önemli bir çoğunluğu laboratuvar ölçeğindedir. Uygulamaya aktarılan ve gerçek ölçekli çözümler halen ihtiyaçlar arasındadır.

Bu konuda Ar-Ge ve yenilikçilik alanları dört ana başlık altında sunulabilir:

1. Yeni Adsorban Geliştirme

- a. Seçici adsorbanların geliştirilmesi: Karışık kirleticilerin bulunduğu su ve atıksudan seçici olarak belli kirleticilerin (veya kimyasalların) uzaklaştırılabileceği seçici adsorbanların geliştirilmesi
- b. Çevre dostu üretim: Hem hammadde hem de üretim süreçlerinde çevre dostu uygulamaların geliştirilmesi.
- c. Atıklardan adsorban üretimi: Hammadde olarak atıkların (tarımsal ve endüstriyel atıklar) kullanıldığı adsorbanların üretimi
- d. Azot ve fosfor seçici adsorbanların geliştirilmesi:
- e. Değerli metal geri kazanım adsorbanlarının geliştirilmesi

- Atıksu akımlarından hem inorganik hem de organik kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkili olan, doğal kaynaklardan, düşük maliyetle ve kolay temin edilebilen yenilikçi adsorbanların geliştirilmesi
- Sürdürülebilir, tekrar tekrar kullanılabilir adsorbanlar üretilmesi
- Düşük değerli atık malzemeden veya endüstriyel yan ürünlerden yüksek değerli adsorban üretilmesi (upcycling)
- Adsorban üretiminde maliyeti ve enerji tüketimi düşük, verimliliği yüksek fiziksel, kimyasal (asit, alkali, oksidan, metal tuzları, diğerleri ile) aktivasyon, impregnasyon ve modifikasyon metotları geliştirilmesi.
- Adsorban üretiminde hammadde olarak kullanılmak üzere sürdürülebilir gözenekli karbon materyallerin termokimyasal süreçlerle eldesi (Hidrotermal karbonizasyon, Torefikasyon (kavurma), Flaş karbonizasyon, Piroliz, Gazlaştırma).
- Hibrit kompozitlerin (biyo-nano, organik-inorganik vb) üretilmesi ve adsorban olarak etkinliklerinin belirlenmesi
- Adsorbanın gerçek atıksu fazından bileşen ayırmada etkinliğinin ve performansının matriks akışkanda ortaya konulması, çok bileşenli ortamdan spesifik bileşene seçici adsorban geliştirilmesi
- Matriks bileşimdeki akışkandan aynı anda birden fazla kirletici maddeyi giderebilen hibrit ve kompozit formdaki yeni adsorbanların ve bunları içeren sistemlerin tasarımı ve üretimi

Polisakkarit bazlı adsorbanların geliştirilmesi :

- Polisakkarit omurgasına fonksiyonel grupların dahil edilmesi, güçlü adsorpsiyon özelliklerine sahip polisakkarit adsorbanların hazırlanması
- Spesifik ligandların eklenmesi, polisakkaritlerin seçici adsorpsiyonunun sağlanması
- Farklı çapraz bağlama stratejileri ile polisakkaritlerin mekanik, şişme ve yüzerme özelliklerinin adsorpsiyon performansını artırıcı yönde geliştirilmesi
- Nanomalzemeler, boncuklar, lifler, filmler, zarlar, süngerler ve jeller gibi farklı farklı stabilitede ve mimarilere sahip polisakkarit malzemelerin oluşturularak adsorpsiyon performansının artırılması
- Polisakkaritlere manyetik, termal ve katalitik aktiviteler gibi ek özellikler kazandırılması
- Polisakkarit bazlı adsorbanların sentezini laboratuvar ölçeğinden büyük ölçeğe taşıyacak hızlı, basit, ucuz ve verimli üretim stratejilerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi

Grafen bazlı adsorbanların geliştirilmesi:

- Konvansiyonel üretim yöntemleri için optimum metotların belirlenmesi ve geliştirilmesi
- Grafen bazlı malzemelerin okside ve indirgenmiş formlarının geliştirilmesi

Karbon nanomateryallerin geliştirilmesi:

- Karbon nanomateryallerin sentezinde kullanılan elektrospining ve CVD metotlarının iyileştirilmesi ve optimizasyonu
- Karbon nanomateryallerin daha işlevsel hale getirilmesi için kovalent, kovalent olmayan grupların işlevselleştirilmesi ve/veya katkı eklenmesi için kullanılan yöntemlerin optimizasyonu

Grafitik karbon nitrit adsorbanların geliştirilmesi:

- Grafitik karbon nitrit malzemelerin sentezi için kullanılan termal polimerleşme metodunun optimizasyonu
- Yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen termal polimerleşme metodu sonucu malzemenin kararsız hale gelmemesi için üretim metodunun geliştirilmesi
- Malzeme sentezinde kullanılan farklı öncül malzemelerin geliştirilmesi

Nanogözenekli karbon adsorbanların geliştirilmesi:

- Nanogözenekli karbon malzemelerin düşük iletkenlikli olması, yüzey kusurları bulunması, yüksek sıcaklıklarda grafitleşme gibi darboğazların giderilmesi için piroliz ve fiziksel ve/veya kimyasal aktivasyonu gibi konvansiyonel sentez metotlarının iyileştirilmesi
- Nanogözenekli karbon malzemelerin üretiminde kullanılan odun, kömür, meyve kabuğu veya polimerler gibi organik öncülere ek olarak çevre dostu farklı öncülerin geliştirilmesi

Biyopolimer özellikli karbon bazlı adsorbanların geliştirilmesi:

- Literatürde var olan şeker, reçine, protein, amino asit ve bitkisel yağ içerikli biyopolimer bazlı karbon malzemelerin iyileştirilmesi, alternatif biyo bazlı malzemeler ile karbon adsorbanların geliştirilmesi
- Hidroksil ve amin gruplarınca zengin, biyo-bazlı bir nanoadsorban olan kitosanın düşük pH değerlerinde adsorpsiyon veriminin düşmesini engellemek için kullanılan grafen impregnasyonu için metotların iyileştirilmesi
- Tarım atıkları, endüstriyel atıklar ve biyokütle bazlı adsorban malzemelerin geliştirilmesi.

2. Kullanılmış Adsorbanların Yönetimi

- a. Rejenerasyon: Termal, kimyasal, mikrodalga, süperkritik sıvı desorpsiyonu, biyolojik vb. yaklaşımlarla farklı rejenerasyon yöntemleri ve kullanılmış adsorbanların tekrar kullanımı için proses geliştirme:
 - b. Farklı Amaçla Tekrar Kullanım (Kullanılmış adsorbanların adsorpsiyon dışında tekrar kullanımı):
 - i. N ve P seçici adsorbanların tarımda kullanımı
 - ii. Katma değeri yüksek ürün geliştirme: Kapasitör, katalizör, katalizör destek malzemesi vb. olarak kullanımı
 - iii. Toprak iyileştirme amaçlı kullanımı vb.
 - c. Yakma ve Depolama: Desorpsiyon kinetiği ve taşınım mekanizmaları, Yanma ürünleri, Termal desorpsiyon yan ürünlerinin tespiti
- Rejenerasyon yöntemlerinin adsorban yüzeyindeki fonksiyonel gruplarla ve buna dayalı olan adsorplama mekanizmasıyla ilişkilendirilmesi
 - Adsorbanların geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılmasının kararlılığının geliştirilmesi, döngüsellüğün sağlanması,
 - Rejenerasyon atıklarının ve kullanım ömrünü tamamlamış adsorbanların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi, başka alanlarda verimli değerlendirme veya verimli nihai uzaklaştırma yöntem ve yaklaşımlarının geliştirilmesi; bu atık malzemelerin, bu yaklaşımlar doğrultusunda yaşam döngüsü analizi ve risk değerlendirmesi
 - Besin kaynağı olarak kullanılmış adsorbanların, N ve P gibi besinlerin uzaklaştırılması durumunda, geri dönüşüm değerinin uzun vadeli kinetik çalışmalarla irdelenmesi
 - Adsorban rejenerasyonunda ekonomik ve adsorban ve adsorbat maddeye uygun bozundurma (oksidasyon, elektrokimyasal, ultrasonik, mikrobiyolojik vb) veya desorpsiyon (termal, termal olmayan) yöntem ve uygulama teknolojisinin geliştirilmesi

- Adsorbanlar olarak endüstriyel yan ürünlerin seçilmesi durumunda malzemelerin kaynağına ve türüne bağlı olarak potansiyel olarak toksik elementler gibi ikincil kirlilik riskinin giderimi veya önlenmesi üzerine yöntemler geliştirilmesi

3. Adsorpsiyon Prosesi Geliştirme

- a. Hibrit sistemler: Adsorpsiyon ve desorpsiyonun simultane gerçekleştiği sistemler
- b. Kapasitif iyonsuzlaştırma
- c. Kromatografik ayırma sistemleri-SMBR'ler

4. Optimizasyon

- Adsorpsiyon sistemi için enerji kullanımı, kimyasal kullanımı, bakım ve işçilik gereksinimleri, proses atıkları, yatırım ve işletme maliyetinin optimize edilmesi
- Erişilebilir, büyük ölçekli sürekli üretim sistemleri geliştirilmesi
- Sürekli sistemlerde proses bazında temas süresi, hidrolik yükleme, kontaminant yükleme, kolon ömrü, işletme koşulları (sıcaklık, pH, basınç vb) optimizasyonu
- Gerçek ölçekli sistem tasarımı, proses konfigürasyonları optimizasyonu

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik sürdürülebilir adsorbanların ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Yanma/kimyasal reaksiyon ürünleri, motor egzozları, zararlı endüstriyel gazların ve buharların sızıntılarının içeren antropojenik toksik kirleticilerin atmosfere salınması, dünya çapında artan bir endişe kaynağıdır. NO_x , SO_x , CO , H_2S , NH_3 , N_2O , Hg gibi tehlikeli bileşikler, diğer nitrojen (örneğin hidrojen siyanür) veya kükürt içeren bileşikler (örneğin organothioller), hidrokarbonlar, uçucu organik bileşikler (benzen, toluen, metanol vb.) çevre hava kirliliği endişesi yaratan bileşiklerdir. Bu gazların ana kaynakları antropojeniktir. Örneğin, SO_2 , NO_2 ve CO emisyonları esas olarak mevcut enerji talebini karşılayan fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanmaktadır. SO_x ve NO_x , çevre ve sağlık için büyük bir tehdit olan fotokimyasal duman ve asit yağmurunun oluşumunda rol oynar. H_2S başka bir zehirli, aşındırıcı ve kokulu gazdır. Hem doğal gazda hem de biyogazda doğal olarak bulunur. Bu gazların kullanımlarından önce saflaştırılması, bu asit kirleticinin geri kazanılması anlamına gelir. Buna ek olarak H_2S yakıt hücresi katalizörlerine zarar verdiği için, reformat gazından çıkarılması, yakıt hücreleri için ultra saf hidrojen üretimi için önem arz etmektedir. NH_3 , gübre, temizleyici, fermantasyon ajanı, antimikrobiyal ajan, soğutucu, N içeren bileşiklerin öncüsü gibi çeşitli amaçlar için farmasötik ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan başka bir hammaddedir. Kirleticilerin yarattığı sorunların üstesinden gelebilmek ve başta küresel ısınmanın yol açtığı sorunları minimize

edebilmek adına uygun yöntemler ve malzemeler ile kirleticileri ortamdaki uzaklaştırırken geri kazanmak sürdürülebilir hava kalitesini sağlayabilmek adına büyük önem arz etmektedir.

Optimizasyon konusunda ürün/teknoloji ihtiyaçları:

- Adsorpsiyon sistemi için enerji kullanımı, kimyasal kullanımı, bakım ve işçilik gereksinimleri, proses atıkları, yatırım ve işletme maliyetinin optimize edilmesi
- Erişilebilir, büyük ölçekli sürekli üretim sistemleri geliştirilmesi
- Sürekli sistemlerde proses bazında temas süresi, hidrolik yükleme, kontaminant yükleme, kolon ömrü, işletme koşulları (sıcaklık, pH, basınç vb) optimizasyonu
- Gerçek ölçekli sistem tasarımı, proses konfigürasyonları optimizasyonu

Alternatif adsorbanlar konusunda ürün/teknoloji ihtiyaçları:

- Hammaddesi düşük maliyetle ve kolay temin edilebilen adsorbanlar geliştirilmesi
- Sürdürülebilir, tekrar tekrar kullanılabilir adsorbanlar üretilmesi
- Düşük değerli atık malzemeden veya endüstriyel yan ürünlerden yüksek değerli adsorban üretilmesi (upcycling)
- Adsorban üretiminde maliyeti ve enerji tüketimi düşük, verimliliği yüksek fiziksel, kimyasal (asit, alkali, oksidan, metal tuzları, diğerleri ile) aktivasyon, impregnasyon ve modifikasyon metotları geliştirilmesi.
- Adsorban üretiminde hammadde olarak kullanılmak üzere gözenekli karbon materyallerin termokimyasal süreçlerle sürdürülebilir eldesi (Hidrotermal karbonizasyon, Torefikasyon (kavurma), Flaş karbonizasyon, Piroliz, Gazlaştırma).
- Hibrit kompozitlerin (biyo-nano, organik-inorganik vb) üretilmesi ve adsorban olarak etkinliklerinin belirlenmesi
- Her sıcaklıktaki atık gazdan daha yüksek verimde arıtım sağlayabilecek adsorbanların geliştirilmesi, bu uygulamanın gerçek ölçekte yapılabileceği sistemlerin tasarımı ve üretimi
- Adsorbanın gerçek atık gaz fazından bileşen ayırmada etkinliğinin ve performansının matriks akışkanda ortaya konulması, çok bileşenli ortamdaki spesifik bileşene seçici adsorban geliştirilmesi
- Matriks bileşimdeki akışkandan adsorpsiyonla ayırıştırma yapan sistemin tasarımı ve üretimi
- Rejenerasyon yöntemlerinin adsorban yüzeyindeki fonksiyonel gruplarla ve buna dayalı olan kontaminant giderim mekanizmasıyla ilişkilendirilmesi
- Döngüsellik sağlanması, rejenerasyon atıklarının değerlendirilmesi, kullanım ömrünü tamamlamış adsorbanların başka alanlarda verimli değerlendirme veya verimli nihai uzaklaştırma yöntem ve yaklaşımlarının geliştirilmesi

- Adsorban rejenerasyonunda adsorban ve adsorbat maddeye göre uygun bozundurma (oksidasyon, elektrokimyasal, ultrasonik, mikrobiyolojik vb) veya desorpsiyon (termal, termal olmayan) yöntem ve uygulama teknolojisinin geliştirilmesi

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünyada

Atıklardan ve güncel alternatif hammaddelerden yeni adsorbanların geliştirilmesi ve adsorbana özgü adsorpsiyon sistemlerinin tasarımında THS: 2-4, Türkiye’de THS:2-4 düzeyindedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya’da	Türkiye’de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Konvansiyonel adsorpsiyon prosesleri için Teknoloji Hazırlık Seviyeleri:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya’da	Türkiye’de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

MOF gibi nispeten yeni adsorbanların üretimleri ve denemeleri için Teknoloji Hazırlık Seviyeleri:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünya'da ve Türkiye'de sürekli yeni adsorbanlar ve adsorbana özgü adsorpsiyon sistemleri tasarlanmakta ve geliştirilmektedir. Zeolit gibi uzun süredir çalışılan fiziksel yolla gaz tutan adsorbanların üretimi ve adsorpsiyon proseslerinin teknoloji hazırlık seviyesi diğer adsorban türlerine göre daha ileri seviyededir. Endüstriyel boyutta üretimleri ve pilot denemeleri yapılmaktadır. MOF gibi nispeten yeni adsorbanların pilot üretimleri ve pilot denemeleri yapılmaktadır; dolayısıyla THS seviyeleri yaklaşık 6-7 seviyesindedir. Türkiye'de ise laboratuvar ölçekli Ar-Ge çalışmaları, pilot üretimler ve pilot denemeler seviyesindedir (THS< 6).

7.2.b. Su ve atıksuların ileri arıtılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Konvansiyonel kaynaklardan AC üretimi THS: ≥ 7

Alternatif atıklardan ve diğer kaynaklardan AC veya diğer adsorbanların üretimi THS: ≥ 3

AC ile su-atıksu arıtımı THS: ≥ 7

Diğer yeni nesil adsorbanlarla su-atıksu arıtımı THS: ≥ 4

Piroliz ile biyokömür üretimi, endüstriyel ölçekte (THS 7 veya daha yüksek) birçok tesisle birlikte, geniş ölçüde bir pilot ölçekte (THS: 6-9) kurulmuştur.

Piroliz işlemleri hammadde olarak karışık biyokütle kullandığında selüloz ve lignin gibi biyokütlerdeki belirli bileşenlerin pirolizi, türetilmiş karbon malzemelerinin özelliklerini potansiyel olarak ince ayarlayabilir. Bu teknikler, katma değerli karbon malzemeleri üretme potansiyeline sahiptir, ancak çoğu hala laboratuvar ölçeğindedir (THS: 2-3).

Selüloz gibi başlangıç biyokütle malzemeleri ticari ürünler olsa da, bu fonksiyonel malzemelerin çoğu hala araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve prototipler yalnızca laboratuvar ölçeğinde doğrulanmıştır (THS: 3-4). Literatürde fonksiyonel biyokütle bazlı bu malzemeler için çok sınırlı maliyet analizleri yapılmıştır.

Yeni Adsorban Geliştirme

Çevre dostu seçici adsorban uygulamaları için Teknoloji Hazırlık Seviyesi:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Reçine tabanlı büyük ölçekli uygulamalar için Teknoloji Hazırlık Seviyesi:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Dünyadaki çevre dostu seçici adsorban uygulamaları genellikle THS 2-5 seviyesinde olup, reçine tabanlı büyük ölçekli uygulamalar ve ticari ürünler mevcuttur (THS 6-9; iyon değiştirici, kompleks reçineleri vs). Seçici sentetik reçinelerin bazı kirleticiler için ticari uygulamaları mevcutken (örneğin bor için Amberlit IRA 743) birçok kirletici için çalışmalar laboratuvar ve pilot ölçeğinde çalışmalarla sınırlıdır.

Kullanılmış Adsorbanların Yönetimi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Adsorpsiyon Proses Geliştirme

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik sürdürülebilir adsorban üretimi ve adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Endüstriyel ölçekte yanma sonrası gaz adsorpsiyonunda Teknoloji Hazırlık Seviyesi:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

THS4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

TSA ile atık gaz arıtımında Teknoloji Hazırlık Seviyesi:

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Adsorban üretimi konusunda Dünyadaki öncü firmalardan bazıları CECA Arkema Group, Honeywell UOP, Zeochem, Zeolyst International, Union Carbide, BASF and The PQ Corporation firmaları, Global CCS Institute – CO₂RE, US Department of Energy – NETL, DHE Endüstriyel, BROFIND, Yedic Mühendislik firmaları da örnek verilebilir. CO₂ giderimi için yaygın olarak kullanılan zeolit 13X, katı amin esaslı mezogözenekli silika esaslı adsorban, VOC için polimer esaslı adsorban (Tenax) geliştirilmesi, pilot ölçekte üretimi, son ürün haline getirilmesi ve adsorpsiyon proseslerinde uygulamasına yönelik çalışmalar TÜBİTAK MAM Kimyasal Proses Teknolojileri Araştırma Grubu bünyesinde 2010 yılından beri gerçekleştirilmektedir.

7.2.b. Su ve atıksuların ileri arıtılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünya’da önde gelen Firmalar: DESOTEC, CABOT-NOTIT, Chemviron, Rembind®, Dexsorb+®, PolyQA-Osorb®, ESLI-AqualinePWG, The Dow Chemical Company, Evoqua Water Technologies, LANXESS, Mitsubishi Chemical Corporation, Purolite, ResinTech Inc.

Dünyadaki önemli aktif karbon üreticileri Kuraray (Japonya), CPL Activated Carbon (USA), Ingevity (USA), Arkema, Cabot Norit Activated Carbon (USA), Calgon Carbon Corporation (USA). Türkiye’de Norm Ltd.

Farklı kaynaklardan, özellikle yerli kaynaklardan, aktif karbon üretimi konusunda çalışmalar yapılmalıdır.

CDI/MCDI uygulamaları dünyada pilot ölçek seviyelerinde test edilmiştir. Ülkemizde çalışmalar laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir (Gebze Teknik Üniversitesi, ODTÜ).

Kromatografik ayırma ve SMBR’ler ilaç ve gıda sanayinde ticari olarak uygulanmaktadır (Novasep, Suzhou bojie resin technology Co.,Ltd). Türkiye’de bu konuda çalışmalar laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmektedir.

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

Dünya Örnekleri: Adsorban üretimi konusunda dünyadaki öncü firmalardan bazıları CECA Arkema Group, Honeywell UOP, Zeochem, Zeolyst International, Union Carbide, BASF and The PQ Corporation firmalarıdır. Darco BG1, Jacobi Carbons, AddSorb Sulfox, BPL Activated Carbon, AtlasCopco,

Türkiye Örnekleri: TRIJEN sıvı yakıt tesisi, İZAYDAŞ

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.b. Su ve atıksuların ileri arıtılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.a-7.2.c maddeleri;

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için üniversitelerde araştırmacı ve akademisyenler ile sektörden konu özelinde yetkinlik sahibi kuruluşlardan oluşan ekipler

kurulması gerekmektedir. Adsorban üretimi için laboratuvar seviyesi araştırma ve geliştirme çalışmalarında üniversiteler ve araştırma enstitülerinin işbirliğinin; geliştirilen ürünlerin endüstri seviyesinde değerlendirilebilmesi için de özel sektörden kuruluşların katılımının teknolojik ilerleme konusunda ivme kazandıracığı değerlendirilmektedir.

İlgili adsorbanların geliştirilmesi konusunda Çevre Mühendisleri (atık yönetimi, geri dönüşüm-geri kazanım çalışmaları yapan), Kimya Mühendisleri (fizikokimya, sentez, temel işlemler çalışmaları yapan), Biyoloji-Kimya disiplinlerinden kişiler, Tarımsal atık ve artıkların kullanıldığı çalışmalarda Ziraat Mühendisleri, Mineralojik atık ve artıkların kullanıldığı çalışmalarda Maden Mühendisleri (Cevher Hazırlama ABD), Kimyacılar, Fizikçiler, Metalürji ve Malzeme Mühendisleri (mineral, kil, kompozit çalışan), Sistem tasarımı ve gerçek ölçekli uygulamalarla ilgili çalışmalarda Elektrik-Elektronik Mühendisleri (sistem konfigürasyonunda elektronik sistemler ve otomasyon), Makine Mühendisleri (Reaktör-Retort işletme, basınç, pompaj, ısı kontrolü sağlama) çok disiplinli veya disiplinler arası bir kurgu ile Ar-Ge çalışması yapabilirler.

Geliştirilen adsorbanların büyük ölçekli denemelerinin yapılabileceği alanlara erişim ve saha uygulamaları için Belediyeler, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, büyük şehirlerde Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlükleri'nden ilgili kişiler çalışma ekibine katılabilir.

Adsorban maddenin hammaddesinin bulunduğu yerde üretilmesi ile düşük maliyetli ve düşük karbonlu malzeme olarak elde edilmesi sağlanabilecektir. Buna göre, örneğin termokimyasal prosten elde edilen çarın hammadde olarak kullanılacağı bir üretimin aynı tesiste yapılması önerilir.

Eko-endüstriyel network kurulması ile benzer sektörlerin atık veya yan ürünlerinin birlikte değerlendirilmesi suretiyle sürdürülebilirliğin artırılması, maliyetin düşürülmesi, hammadde kullanım verimliliğinin sağlanması mümkün olabilecektir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

7.2.a. Sentez gazının ileri saflaştırılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.b. Su ve atıksuların ileri arıtılmasında kullanılacak sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.c. Yakma tesislerinde zararlı gazların tutulmasına yönelik sürdürülebilir adsorban üretimi ve ilgili adsorpsiyon teknolojilerinin geliştirilmesi

7.2.a-7.2.c maddeleri;

Ülkemizde adsorban üretimi konusunda hizmet veren kuruluş sayısı oldukça kısıtlıdır. Norm Ltd. sentetik reçineden küresel aktif karbon üretimi gerçekleştirmektedir. Adsorpsiyon alanında

literatür ölçekli ve uygulamaya aktarılan bir çok çözüm geliştirilmiştir. Bunların çoğu yeni adsorban denemeleridir. Elde edilen adsorbanı pilot veya gerçek ölçekte sisteme aktaran proje çalışması daha sınırlıdır. Birçok üniversitede AR-GE çalışmaları yürütülmekle birlikte pilot ölçek, büyük ölçek ve ticarileşme konularında eksiklikler bulunmaktadır.

Çalışmalar sanayi üniversite iş birliği çerçevesinde yürütülmelidir. Sanayi kuruluşlarının ürün ve proses geliştirme konusunda üniversitelerle kısa, orta ve uzun vadeli iş birliği gerçekleştirilmesi ticarileşme açısından önemlidir. Ayrıca bazı spesifik ürünlerin geliştirilmesi Kamu üniversite iş birliği ile gerçekleştirilebilir. Örneğin, N ve P seçici adsorbentlerin geliştirilerek tarımda uygulama Tarım Bakanlığı ve üniversiteler iş birliği ile gerçekleştirilebilir

Adsorpsiyon uygulamalarında sistemin üç ana bileşeni olan adsorban madde, adsorbat madde ve taşıyıcı ortamın çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri sistem performansını doğrudan etkilediği için bunlarda herhangi bir modifikasyonun etkilerinin belirlenmesi yeni bir araştırma konusudur. Bununla birlikte bu konunun ölçeği her zaman Ar-Ge projesi boyutunda olmayacaktır. Bu sebeple örneğin Ar-Ge merkezi modeli uygulanarak özel durumların veya değişikliklerin etkileri hızlı ve anlık araştırmalarla belirlenebilecektir.

Atık mateyalden veya yeni hammaddeden sentezleyerek yeni adsorban geliştirme çalışmaları küçük veya orta ölçekli Ar-Ge projesi olarak çalışılabilir. Bu tür proje çalışmalarında sadece adsorplama performansı, kinetiği ve termodinamiğine odaklanılması yeterli olmayacaktır. Mutlaka sürekli sistem kolon için model ve pilot ölçekli çalışma yapılmalıdır. Beraberinde proses optimizasyonu, rejenerasyon yönteminin belirlenmesi ve optimizasyonu, tekrarlanabilirliğin, kolon ömrünün belirlenmesi ve nihayetinde kullanım ömrünü tamamlamış adsorbanların yeni nesil değerlendirme yaklaşımı bir bütün olarak çalışmada yer almalıdır. Adsorbanın elde edilme aşamasından kullanılmış adsorbanın sonraki değerlendirme yöntemine kadar tüm sürecin karbon ayak izi ve enerji tüketimi hesaplanmalı ve optimize edilmelidir. Bu kapsamda özellikle adsorban geliştirilmesinin yanı sıra pilot ölçekli sistemin tasarlanması, kurulumu ve optimizasyonunu da içeren çalışmalar küçük ölçekli Ar-Ge projesini takiben orta ölçekli bir teknoloji platformu ile başarıya ulaştırılabilir. Gerçek ölçekli sistem kurulumu ve sürdürülebilir işletimi için daha büyük ölçekli teknoloji platformu altında ayrı yürütülecek tasarım, kurulum, optimizasyon, performans geliştirme projeleri yapılabilir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

AR-GE Faaliyeti	AR-GE Süresi	Vade	Bütçe (TL)
-----------------	--------------	------	------------

Yeni Adsorban ve Adsorpsiyon Prosesi Geliştirme	1-3	Kısa	50 Milyon
Pilot ölçekli adsorban üretimi ve Adsorpsiyon Prosesi Geliştirme	3-5	Orta	75 Milyon
Kullanılmış Adsorbanların Yönetimi (lab ölçekli - pilot ölçekli)	1-5	Kısa-Orta	100 Milyon
Endüstriyel ölçekli Adsorpsiyon Prosesi Geliştirme	3-5yıl – >5 yıl	Orta - Uzun	150 Milyon
Toplam			375 Milyon

Yeni adsorban geliştirme, pilot ölçekli üretim ve adsorpsiyon prosesi geliştirme, Kullanılmış adsorbanların yönetimine yönelik lab ve pilot ölçekli çalışmalar için birden fazla proje yukarıda verilen toplam bütçe öngörülerini dahilinde desteklenebilir.

THS 4-5'e kadar olan adsorban geliştirilmesi, optimizasyonu, üretim prosesi tasarlanması, pilot ölçekte kurulumu, adsorpsiyon sistemi tasarımı ve pilot ölçekte kurulumu gibi küçük ve orta ölçekli çalışmalar ortalama 1-3 yıl arasında tamamlanabilecektir. Bu tür çalışmalar kısa vadede sonuçlandırılabilir olduğundan hedefler de benzer şekilde kısa vadeli olmalıdır. Ancak hedef THS 9 olmalıdır ve orta/uzun vadede hem adsorban üretim sisteminin, hem de adsorbanların kullanıldığı ayırma-safılaştırma sistemlerinin tasarım, kurulum, optimizasyon ve ticarileşme çalışmaları da tamamlanmalıdır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Ar-Ge için fon sağlanması en önemli husustur. Kimyasal, makine ve teçhizat temini oldukça uzun süreler almakta maliyetleri ise gümrük vergisi, ara komisyonlar nedeni ile yurt dışına göre oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle Ar-Ge amacı ile kullanılacak sarf malzemesi ve makine teçhizat için doğrudan alım ve vergi muafiyetleri Türkiye'deki Ar-Ge çalışmalarını rekabet gücünü artıracak önemli hususlar olarak öne çıkmaktadır.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Diğer taraftan özellikle atık yönetimi mevzuatında bazı atıkların temini, kullanımı, nihai bertarafı gibi hususlardaki katı hükümler, bu atıkların döngüsel ekonomi uygulamalarına dahil olmalarını engellemektedir. Söz konusu atıkların hem Ar-Ge hem de pilot ve gerçek ölçekli uygulamalarda

kullanılabilmesine kontrollü olanak sağlayan yasal düzenlemeler yapılmadığı sürece bu alanda yatırım ve uygulamaya yönelim ve teşvik mümkün olmayacaktır.

Teknik Altyapılar

TUBİTAK UME, TÜRKAK ve TSE altyapısı sertifikasyon ve standardizasyon için yeterlidir.

İnsan Kaynakları

Üniversitelerde, Araştırma Merkezlerinde ve sanayide konu ile ilgili insan kaynağı açısından bir kısıt bulunmamaktadır. Doğru yönlendirme ve hedeflerle yukarıda belirtilen Ar-Ge çalışmalarının tamamı ülkemizde gerçekleştirilebilir.

Destek ve Teşvikler

THS 6 seviyesine kadarki Ar-Ge çalışmaları için TÜBİTAK-ARDEB projeleri ile destek sağlanabilir. THS 9 seviyesi hedeflenen projelerde TÜBİTAK-TEYDEB veya Hamle çağrısına çıkılabilir.

Çeşitli teşvik programları ile (TEYDEB, hibe, uzun vadeli kredi vs) geliştirilecek ürünlerin ticarleştirilmesine katkı sunulabilir.

Müşteri kuruluşların, teknoloji sağlayıcı olarak en az bir KOBİ statüsündeki şirket, bu konuda tecrübeli en az bir üniversite araştırma laboratuvarı/merkezi ya da kamu araştırma merkezi/enstitüsü ve TÜBİTAK Enstitüleri ile konsorsiyum oluşturmaları işbirliği modelinde çağrılar da bu alanda ilerleme sağlayabilecek teşviklerdir.

Teknolojik Hedef 8:

**KAUÇUK SEKTÖRÜNDE KULLANILABİLECEK YENİ VEYA GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ALTERNATİF MADDELER**

*Kauçuk sektöründe Pirolitik/geri dönüşüm yaklaşımlarının, karbon karası
üretiminin ve karbon karası yerine daha yeşil alternatif ürünlerin geliştirilmesi*

Kritik Ürün/Teknoloji 8.1.

8.1. Kauçuk sektöründe yenilikçi geridönüşüm proseslerinin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Kritik Ürün/Teknoloji 8.1.

8.1. Kauçuk sektöründe yenilikçi geridönüşüm proseslerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Yaklaşık yüz yıldır hayatlarımızın birçok alanına giren kauçuk esaslı malzemelerin geridönüşüm teknolojileri üzerinde yıllardır ülkemizde ve dünyada çalışmalar yapılmaktadır. Fakat zorlu mekanik, termal ve kimyasal koşullara dayanıklı olmalarını sağlayan kimyasal çaprazbağlarla güçlendirilmiş yapıları, aynı zamanda bu malzemelerin ürün yaşam döngüsünde zorlukları beraberinde getirir. Kauçuk malzemelerin geridönüşümü, atıkların işlenmesi ve kauçuk esaslı yeni malzemelerin üretim proseslerinde olabildiğince yüksek oranlarda tekrar kullanılabilmesi anlamına gelir. Bunun için kullanılan, katma değeri en yüksek iki teknoloji, atıktaki çaprazbağların seçimli olarak kırılması (devulkanizasyon) sonrasında yeni hazırlanan kauçuk hamurlarında hammadde olarak tekrar kullanımı ve atığın yüksek sıcaklıkta bozundurulması karbon siyahı ve mineral yağ elde edilmesi (piroliz) olarak sıralanabilir.

2021 yılında ülkemize 1,9 milyon ton kauçuk ürün ve kauçuk hammaddesi girmiştir. 850 bin ton kauçuk ürün doğrudan, yaklaşık 500 bin ton ürün de ağırlıklı olarak otomotiv ve makineler içinde dolaylı olarak ihraç edilmiştir. Yaklaşık 200 bin ton ömrünü tamamlamış lastik (ÖTL), çoğunlukla alternatif yakıt olarak bertaraf edilmiştir. Kalan 300 bin ton kauçuk esaslı malzeme, ömrünü yurdumuzda tamamladıktan sonra kullanılmayan katı atık olarak birikmiştir. Bu durum ülkemize özel değildir; malesef tüm dünyada kauçuk atıklardan kurtulmanın en yaygın yöntemleri, doğada veya atık depolama alanlarında biriktirilmeleri ve alternatif yakıt olarak kullanılmalarıdır.

Öte yandan, yurdumuzda üretilmeyen kauçuk hammaddelerinin, üretildikleri yerlerde de karbon ayakizleri yüksektir. Kauçuk ürünlerin geri dönüşümü, hem atıkların çevreci bertarafını, hem kauçuk sektörünün hammadde ithalatına bağımlılığının azaltılmasını, hem de üretim aşamasında hammadde ikamesi sayesinde karbon ayakizinin azalmasını sağlayacaktır.

Kauçuk esaslı atıkların arasında, ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL) ve lastik üretimi esnasında oluşan yarımamul hurdaları önemli bir payı oluşturmaktadır. Bununla birlikte,

özellikle otomotiv ve yapı sektörü gibi ülkemizin sürücü sektörlerinde de oldukça yüksek miktar ve çeşitlilikte kauçuk esaslı malzeme kullanılmaktadır. Söz konusu kauçuk malzemeler genellikle detaylı profillerde üretilen ve değişim sıklığı yüksek olan malzemelerdir. Hem üretimleri sırasında, hem de kullanım ömrünü tamamladıktan sonra önemli miktarda atık oluşumuna neden olmaktadır. Üretim sırasında oluşan atıklar, ağırlıklı olarak vulkanize olmuş kenar kırıntılarından oluşmaktadır. Vulkanize olmuş atıkların ise çaprazbağlı kimyasal yapılarından dolayı plastiklerde olduğu gibi kolayca geri kazanılıp tekrar kullanılmaları mümkün değildir.

Kauçuk esaslı atıkların bertarafı ve geri kazanımında uygulanan stratejiler ilkinden gelişmişe doğru depolama, enerji elde etmek üzere yakma tesisleri ve çimento fırınlarında yakma, fiziksel geri kazanım (öğütme), piroliz ve devulkanizasyon olarak sıralanabilir. Atık depolama ve yakma, yeşil ekonomiye geçiş için uygun değildir. Fiziksel geri kazanım ile elde edilen geri dönüşüm ürünleri, zemin ve çatı kaplamaları gibi düşük katma değerli uygulamalarda kullanılabilir gibi tane büyüklüğü ve yüzey özelliklerine göre yeni hazırlanan kauçuk hamurlarında da değerlendirilebilir. Fakat genel olarak kauçuk matrisinde zayıflatıcı etki sergiledikleri için kullanım alanları sınırlıdır [1-3].

Devulkanizasyon ve piroliz alanlarında ise bugüne kadar yapılan çalışmalar, bu yöntemlerin teknik ve ekonomik katkılarını iyileştirse dahi, sürdürülebilir seviyelere henüz taşıyamamıştır. Ömrünü tamamlamış lastiklerden malzeme olarak geri kazanımın sağlandığı tek ısıl dönüştürme yöntemi pirolizdir. Piroliz, oksijen yokluğunda meydana gelen ve pirolitik sıvı (piroliz yağı), biyoçar ve piroliz gazı üretimiyle sonuçlanan termal bozunma/ayırışma işlemidir. Katalizörlü veya katalizörsüz, inert, vakum, hidrojen gibi ortamlarda sıcaklık etkisiyle bozunma temeline dayanır. Piroliz yavaş, hızlı ve flaş piroliz olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Yavaş Piroliz düşük sıcaklık (400 °C), düşük ısıtma hızı ve uzun kalma zamanında gerçekleşmekte olup katı ürün (odunkömürü) verimi oldukça yüksektir. Hızlı ve flaş pirolizde sıvı biyoyakıt ürün verimi oldukça yüksektir. Hızlı piroliz 500-700 °C aralığında, kısa kalma zamanında ve 300 °C/dakika ısıtma hızında yürütülmektedir. Literatürde karbonizasyon olarak da isimlendirilen piroliz işlemi, düşük sıcaklık (400-500°C), orta sıcaklık (600-700°C) ve yüksek sıcaklık (900°C ve üstü) karbonizasyonu şeklinde de sınıflandırılmaktadır. Piroliz teknolojisi kömür, bitümlü şist, asfaltitlerden sıvı ve gaz ürün eldesinde kullanılmış, daha sonra da hurda lastik, atık plastikler ve diğer karbonlu atıklara uygulanmaya başlanmıştır. Karbonlu katı atığın bileşimine, proses parametrelerine (sıcaklık, basınç, ısıtma hızı, inert gaz, reaktif gaz) ve reaktör modeline (geometri ve kalma süresi) bağlı olarak piroliz işlemiyle elde edilecek gaz, sıvı ve katı ürün miktarları ve bileşimleri değişebilmektedir (4) Piroliz yöntemiyle elde edilen gaz ürünün bileşimi, gazlaştırma yöntemiyle elde edilen sentez gazı bileşimine benzerlik gösterir. Piroliz işleminde elde edilen sıvı ürün bileşimi:

- Hafif yağlar, kaynama noktaları 220°C'den düşük,
- Orta yağlar, kaynama noktaları 220-375°C,
- Yüksek yağlar, kaynama noktaları 375-450°C, olarak sınıflandırılabilir.

Düşük ve orta sıcaklıkta gerçekleştirilen (Konvansiyonel) pirolizde, piroliz yağı ana üründür ve farklı şekillerde değerlendirilebilmektedir. Örneğin piroliz yağı sentez gazı elde etmek üzere gazlaştırılmakta ve çeşitli kimyasallara ve yakıtlara katalitik olarak dönüştürülebilmektedir. Piroliz yağı, alternatif olarak, petrol rafinerilerine iletilmekte ve hidro-işlem veya kraking ile biyoyakıt, kimyasal hammadde (örn. nafta) ve kimyasal yapı taşları (örn. propilen) üretilebilmektedir. Piroliz yağı yapıştırıcı/reçinelerde de kullanım alanı bulmaktadır.

Fosil yakıtların piroliz işleminde çok fazla uygulama bulan retortlama (kesikli piroliz reaktörleri) tekniği hurda lastiklerin pirolizinde çok fazla kullanılmıştır. Ancak, retortlama tekniğinin en önemli sakıncası, düşük kapasitelerde uygulanabilirliğidir. Günümüzde yeni nesil sürekli piroliz sistemleri ile çeşitli biyokütle ve endüstriyel atıkların pirolizi yüksek kapasitelerde mümkün olabilmektedir. Son senelerde uygulanan yüksek sıcaklık piroliz teknolojisiyle hidrojen, metan ve karbonmonoksit içeriği yüksek sentez gazı üretimi mümkün olabilmektedir (5).

Ömrünü tamamlamış lastiklerin pirolizinden elde edilen pirolitik yağ çoğunlukla sıvı yakıt olarak kullanılmaktadır. Piroliz ünitesine beslenen atık bileşiminin sürekliliğinin sağlanmasının mümkün olmaması ve ÖTL'nin içerdiği yüksek oranda kükürt nedeniyle pirolitik yağın bu hali ile iyi kalitede yakıt olarak kullanılması neredeyse olanaksızdır. Ayrıca pirolitik yağın yakıt olarak kullanımının önünün açılabilmesi için önemli yasal düzenlemelere ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, sıvı piroliz ürünlerinin kalitesinin ve veriminin artırılmasına yönelik çok sayıda çalışma yürütüldüğü de bilinmektedir [6,7].

Karbon ve değişken bileşimde külden oluşan katı ürün, lastik yapısından gelen çelik ve diğer kirlenmelerden arındırıldıktan sonra pelet haline getirilerek kullanılabilir. Katı piroliz ürününün fiziksel ve ısıl özellikleri incelendiğinde, kömüre çok yakın olduğu ve herhangi bir değişikliğe gerek duyulmaksızın güç santrallerinde kömür ile birlikte temel yakıt olarak kullanılacağı görülmektedir. Alternatif uygulamalarda kullanım potansiyeli olan bir geri dönüşüm ürünü için yakma, şüphesiz ki en son dikkate alınması gereken çözümdür. Çok büyük bir kısmı toz karbon olan katı piroliz ürünü, kauçuk sektörü başta olmak üzere plastik ve boya endüstrileri gibi çok sayıda uygulamada değerlendirilebilir görünümündedir. Bununla birlikte, lastik (tyre) ya da lastik dışı (non-tyre) kauçuk endüstrilerinde kullanılan ve takviye edici özellikteki standart karbon karalarına (N220, N330, N550 gibi) kıyasla düşük performans özellikleri sergilemektedir. Tane büyüklüğü açısından bakıldığında standart karbon karalarının belirli sınıflarına dahil edilebilir olmasına rağmen, yüzey kimyası ve aglomerat yapısı (structure) açısından standart karbon karalarından oldukça farklıdır; içine katıldığı kauçuk esaslı ürünün özelliklerini takviye etmek yerine, çoğunlukla zayıflatıcı etki göstermektedir [8,9]. Bu nedenlerle

uygun yüzey ya da yapısal işlemlere tabi tutulmaksızın, kauçuk endüstrisinde doğrudan ve standart karbon karalarına alternatif olarak kullanımları olası görünmemektedir.

ÖTL dışında fındık kabuğu, ceviz kabuğu, kayısı çekirdeği, şeftali çekirdeği ve vişne çekirdeği gibi çeşitli tarımsal atıklardan yola çıkılarak toz karbon üretimine yönelik piroliz çalışmaları da yürütülmektedir. Bu atıklar, tek başlarına piroliz edildiği gibi, çeşitli oranlarda karıştırılarak da değerlendirilmektedirler. Bu gruptaki çalışmaların ÖTL pirolizinden en önemli farkları, katı ürünün esas alınması ve proses koşullarının (sıcaklık, işlem süresi gibi) farklılıklar sergileyebilmesidir. Elde edilen toz karbonun özellikleri, ÖTL pirolizinden elde edilen üründe olduğu gibi takviye özellikleri açısından son derece zayıftır ve kauçuk hamurlarında ancak ucuzlatıcı dolgu olarak kullanılabilir [10-12].

Karbon karası, 10-300 nm aralığında değişebilen tane büyüklüğüne sahip bir dolgu maddesidir. Bu açıdan bakıldığında “nano-malzeme” olarak değerlendirilebileceği anlaşılmasına rağmen karbon karaları, bağımsız tanecikler halinde değil uzun salkımı yapısında agregalar halinde bulunduğu için pratikte “nano-malzeme” olarak adlandırılmazlar. Agregalar halinde bulunma özellikleri sayesinde, içinde kullanıldıkları kauçuk esaslı malzemeleri takviye ederler. Takviye fonksiyonları, taneciklerin tek başlarına polimer zincirleri arasına girerek dolgu görevi görmesi ile değil, en basit tanımı ile üzüm salkımı şeklinde dallanmış zincirlerin polimer zincirleri etrafını sararak zincirleri taşıması şeklinde gerçekleşir. Bu üzüm salkımı yapısı ne kadar büyükse, karbon karasının takviye özelliği de o kadar iyidir. Takviye fonksiyonu ile fiziksel ve mekanik özelliklerde belirgin bir iyileşme sağlayabilmekle birlikte, karbon karalarının yüksek yapılı olmaları, kauçuklarda sıklıkla karşımıza çıkan dinamik uygulamalarda daha düşük yorulma ve daha düşük histeresis kaybı gibi kritik malzeme beklentilerini karşılamakta da son derece önemlidir [13]. Bu bağlamda, lastik ve lastik dışı kauçuk endüstrilerinde, performans gerektiren kauçuk esaslı malzemelerde, düşük yapı özelliği sergileyen piroliz ürünü karbon karalarının kullanımı teknik olarak avantajlı değildir. Piroliz ürünü karbon karasının, mevcut teknoloji ile, ancak renklendirici ya da performans beklenmeyen kauçuk malzemelerde ucuzlatıcı olarak kullanımı değerlendirilebilir.

Piroliz toz ürünlerinin kauçuk hamurlarında kullanımını sınırlayan diğer faktörler ise safsızlık ve yetersiz yüzey fonksiyonelliğidir. Karbon karası yüzeyindeki safsızlıkların (özellikle asidik yapılı ve metalik kalıntılar) vulkanizasyon reaksiyonunu geciktirici/engelleme etkisi gösterdiği iyi bilinmektedir. Bu durum, katı piroliz ürününün kullanımını belirgin şekilde sınırlandırmaktadır. Karbon karasının kauçuk zincirleri ile olan etkileşimi agregaların fiziksel olarak zinciri takviye etmesiyle sınırlı kalmaz; karbon yüzeyinde üretim tekniğine göre farklı konsantrasyonlarda oluşan –OH ve –COOH gibi fonksiyonel grupların kauçuk zinciri ve kauçuk hamurunda yer alan katkı maddeleri ile tepkimeye girmesi ile de takviye sağlanır [14].

Pirolizin diğer bir ürünü olan piroliz gazı, karbon oksitleri, hafif alifatik hidrokarbonlar, hidrojen ve su buharı karışımıdır. Gazdaki su buharı pirolize tabi tutulan malzemenin neminin buharlaşmasının yanı sıra, çeşitli kimyasal tepkime ve bozunmalar sonucunda da oluşmaktadır. Piroliz gazı karbonlu malzemenin yapısındaki bağların kırılmasıyla oluşur; hidrojen, metan, etan, eten ve propan gibi alifatik hidrokarbonlar, karbon dioksit ve karbon monoksit gibi düşük molekül ağırlıklı gazları içerir. Piroliz gazının içerisinde pirolize tabi tutulacak malzemedeki inorganik ve organik kükürtlü yapıların bozunması sonucu hidrojen sülfür ve amonyak gibi gazlarda oluşabilmektedir. Pirolize tabi tutulan karbonlu malzemenin elementer analizine bağlı olarak gaz ürünlerin hacimce bileşiminin %5-40 karbon monoksit, %5-50 hidrojen, %3-40 metan, %1-15 C2 ve C3 hidrokarbonları, %1-10 karbon dioksit şeklinde değiştiği literatür bilgilerinden anlaşılmaktadır. Bu veriler göz önüne alındığında pirolizden elde edilen piroliz gaz ürününün ısı değerleri de 2500 kkal/Nm³ ile 4750 kkal/Nm³ arasında değişim gösterebilmektedir. Yeni nesil sürekli piroliz reaktörlerinde yüksek sıcaklık uygulamaları ile gaz ürün verimlerinde ciddi artışlarla birlikte gaz kalitesinde de önemli iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Devulkanizasyon, vulkanize olmuş kauçuk esaslı atıkların yapısındaki tersinmez çaprazbağların çeşitli yollarla kırılarak, atığın tekrar vulkanize edilebilecek forma kavuşturulması işlemlerinin genel adıdır. Bu yöntem, kimyasal ajanlar varlığında ve/veya atığa dışarıdan enerji verilmesi ile, bu enerjinin tercihen mikrodalga enerjisi, ultrasonik enerji ve iyonlaştırıcı radyasyon gibi alternatif enerji uygulamalarından sağlanması ile gerçekleştirilebilir. Parçalanacak olan çaprazbağlar doğrudan ana zincir üzerindeki karbon atomları üzerinden veya zincirler arasına kimyasal bağlarla tutunmuş olan çapraz bağlayıcı ajanlar aracılığıyla oluşmuş olabilir. Bununla birlikte, kauçuk esaslı atıkların çok büyük kısmını kükürt ile çapraz bağlanmış atıklar oluşturmaktadır. Geliştirilecek devulkanizasyon yöntemlerinin öncelikli olarak kükürt çaprazbağlarının kırılmasını hedeflemesi beklenmektedir [15-18].

Devulkanizasyon yönteminde önde gelen başarı kriterleri; atık yapısında bulunan çaprazbağların yüksek verimle kırılması, bir başka deyişle çaprazbağ yoğunluğunun yüksek verimle azaltılabilmesi ve bu sırada kauçuk ana zincirinin mümkün olan en az düzeyde kesilmeye uğramasıdır. Mevcut durumda endüstriyel boyutta ve yaygın olarak uygulanan devulkanizasyon tekniklerinin tamamında elde edilen devulkanize atık, tekrar vulkanize edildiğinde yeni hazırlanan hamura göre belirgin seviyede düşük mekanik özellikler vermektedir. Bu problemin çözümü için uygulanan teknikler, yüksek maliyetleri ve/veya

uygulama güçlükleri nedeniyle ticarileşememektedir. Geliştirilen yöntem, hem çapraz bağ kırma verimi, hem ana zincirdeki zayıflama, hem ekonomik sürdürülebilirlik açılarından değerlendirilmelidir.

Devulkanize edilen atıkların yeni hazırlanan kauçuk hamurlarında ne ölçüde yüksek katma değer ile kullanılacakları, atıktaki kauçuk yapısının ilk haline ne kadar benzer seviyede kaldığı ve atık içerisinde hala çaprazbağlı olan segmentlerin ne kadar az oranda olduğu ile ilişkilidir. Seçilen devulkanizasyon tekniğinin öncelikli hedefleri bu doğrultuda olması önemlidir.

Devulkanizasyon sırasında çaprazbağların yanı sıra, kauçuk ana zincirinin de kırılması, elde edilen geri dönüşüm ürününün özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Çaprazbağların seçimli olarak kırılmasını sağlayacak devulkanizasyon yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmaların sürdürülebilir çevre ve yeşil dönüşüme önemli katkılar sağlayacağı açıktır.

Kauçuk ürünler, malzemenin maruz kalacağı şartlara ve ekonomik beklentilere bağlı olarak, çok çeşitli hammaddeler kullanılarak üretilirler. Kauçuk üründe yoğunlukla birden fazla tipte polimer mevcuttur. Başarılı bir devulkanizasyon yöntemi, ya ayrıştırılabilir ve yeterli miktarda toplanılabilir bir atık tipi üzerinde, ya da farklı yapılarıdaki kauçukların genelinde istenilen metrikleri karşılayabilmelidir.

Devulkanize edilen atığın yeni hazırlanan kauçuk hamurlarında kullanımı durumunda son ürün özelliklerini etkileyen özellikler arasında atığın yeni kauçuk matrisi ile uyumu ve taşıdığı serbest kimyasal türlerin tip ve miktarları da bulunmaktadır. Geliştirilecek devulkanizasyon yönteminde, atığın devulkanizasyonu sırasında açığa çıkan ve atık içerisinde serbest halde bulunan, temel olarak çaprazbağlayıcı ajanlar ve hızlandırıcılar kaynaklı olan kimyasal türlerin etkinliğinin giderilmesi atığın tekrar kullanım potansiyelini geliştirebilecek yenilikçi alanlar olarak düşünülebilir. Bu türlerin giderilmemesi durumunda, devulkanize edilmiş atıktan hazırlanan yeni malzemelerin işlenmesi, vulkanizasyon davranışları ve dolayısıyla servis performansları önemli ölçüde etkilenmektedir. Bunun yanı sıra, devulkanizasyonun alternatif enerji araçlarıyla (mikrodalga enerjisi, ultrasonik enerji ve iyonlaştırıcı radyasyon gibi) uygulanabilir olması, yöntemin yenilikçi, temiz ve parametrik olarak geliştirilebilir olmasının da önünü açabilecek çözümler arasında düşünülebilir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

ÖTL ve bitkisel kökenli atıkların pirolizi ile elde edilen katı ürün çok büyük oranda toz karbondan oluşmaktadır. Bu katı ürün, çoğunlukla kömüre eşdeğer yakıt olarak değerlendirilmektedir. Katı

ürün, birçok endüstriyel uygulamada renklendirici ve/veya ucuzlatıcı dolgu olarak kullanıma uygun olmakla birlikte, lastik ve lastik dışı kauçuk malzeme endüstrisinde takviye edici dolgu maddesi olarak kullanıma uygun özellikleri taşımamaktadır.

Kauçuk hamurlarında kullanılan standart karbon karası tiplerinden bazıları, yakın geçmişe kadar ülkemizde Petkim Yarımca tesislerinde üretiliyor olmasına rağmen, 20 yıldan uzun bir süredir, önemli bir kısmı Rusya ve Çin'den olmak üzere, tamamı ithalat yoluyla tedarik edilmektedir. Lastik ve kauçuk malzeme üretim hacmi oldukça yüksek olan ülkemizde, bu ürünlerin önemli bir kısmını oluşturan kritik bir hammaddenin tamamen ithalat yoluyla karşılanması, ekonomik ve stratejik açıdan dikkate alınması gereken bir konudur. Ülkemizde tekrar karbon karası üretimine yönelik girişimlerin olduğu bilinmekle birlikte, bu alanda kesinleşmiş ve işlevsel hale getirilmiş bir yatırım yoktur. Bu bağlamda karbon karasının, beklenen performans özelliklerini karşılayabilecek şekilde, petrol ve doğalgaz dışındaki alternatif kaynaklardan, mümkünse atıklardan çıkılarak üretiminin ülkemizin teknolojik ve ekonomik gelişimine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Piroliz yoluyla elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında takviye edici ve standart karbon karası tiplerine alternatif olarak kullanılabilmesi için saflık, yüzey fonksiyonelliği ve en önemlisi de yapı (structure) özelliğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun ancak piroliz proses parametrelerinin katı ürün kalitesini iyileştirecek şekilde değiştirilmesi ve son ürünün ilave işlemlere tabi tutulmasıyla mümkün olabileceği düşünülmektedir.

Kauçuk hamurlarında takviye edici özellik sağlayabilmesi için karbon karası tanelerinin öncelikle kauçuk zincirleri arasına girebilecek büyüklükte olması gerekmektedir. Bu büyüklük teorik olarak 100 nm'nin altı olarak ifade edilebilir. Bununla birlikte, takviye edici standart karbon karası tipleri incelendiğinde bu değer 10-20 nm arasında olduğu görülmektedir [13,14].

Piroliz yolu ile elde edilen karbon karasının tane büyüklüğü piroliz prosesine ilave edilen adımlarla bu seviyelere getirilebilmektedir. Bununla birlikte, elde edilen karbon karasının yüzey fonksiyonelliği ve yapı değeri (structure), standart karbon karası tipleri ile karşılaştırılabilir seviyede değildir. Yapı değerinin DBP sayısı (yüzeyde adsorplanan dibütil ftalat miktarı) türünden 50-150 cm³/100 g seviyesinde olması, kauçuk hamurlarında makul bir takviye edicilik için ihtiyaç duyulan bir durum olarak ifade edilebilir.

Karbon karasının saflığı, özellikle metalik yapıda ve asidik karakterdeki kalıntıları içermemesi, kauçuk hamurunun vulkanizasyonu aşamasında ve vulkanizasyon sonrasında termo-oksidatif yaşlanmaya karşı dayanım açısından son derece önemlidir. Bu bağlamda, piroliz katı ürününün pratikte %98'in üzerinde karbon içermesi, içerdiği safsızlıkların da yukarıda sayılan etkilere neden olmaması kritik bir beklentidir.

Piroliz yöntemiyle alternatif kaynaklardan üretilebilecek karbon karasının yukarıdaki özellikleri sağlayabilmesi için piroliz proses adımlarında halen yürütülen uygulamalara göre değişikliğe gidilmesi ve/veya katı ürünün istenen özellikler doğrultusunda geliştirilebilmesi için piroliz sonrasında ilave işlemlere tabi tutulmasının gerekli olduğu düşünülmektedir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya’da	Türkiye’de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ülkemizde uygulanan devulkanizasyon teknikleri genel olarak öğütülmüş atığa doğrudan ısı enerjisi uygulanarak ve mekanik kuvvet eşliğinde degradasyonu temeline dayanmaktadır. Bu yolla elde edilen ürüne “rejenere kauçuk” adı verilmektedir. Bu uygulamada, atıktaki çaprazbağların yeterli seviyede kırılmıyor olması ile birlikte, mekanik etki nedeniyle ana zincir kesilmelerinin de önüne geçilememektedir. Rejenere kauçuk üretimi halen endüstriyel boyutta uygulanmakta ve THS 9 seviyesindedir.

Ulusal destekli projeler kapsamında gerek üniversiteler, gerekse de sanayi kuruluşları tarafından gerçekleştirilen sınırlı sayıda devulkanizasyon çalışmasının laboratuvar ölçeğinde doğrulanmış ve bir kısmının pilot ölçeğe uyarlanmış olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda yenilikçi devulkanizasyon çalışmalarının THS 4 seviyesinde olduğu söylenebilir.

Dünyada da yüksek hacimlerde uygulanan devulkanizasyon prosesleri Türkiye’dekinden çok farklı değildir. Bununla birlikte, kimyasal eşliğinde devulkanizasyon, ultrasonik yöntem ve son

dönemde süperkritik akışkan yöntemi ile devulkanizasyon yöntemleri başta olmak üzere yenilikçi teknikler de görece küçük hacimlerde ticari olarak uygulanmaktadır. Bu bağlamda, yeni teknikler için dünyada THS 8 seviyesine ulaşılabilirdiği söylenebilir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya’da	Türkiye’de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hem ÖTL, hem de bitkisel kökenli atıkların pirolizinden karbon karası üretiminin gerçekleştirildiği endüstriyel sistemler bulunmaktadır. Bu sistemlerde hedef ürün karbon karası olmamakla birlikte, piroliz ürünlerinin önemli bir kısmını, büyük ölçüde karbondan oluşan katı ürün oluşturmaktadır. Söz konusu endüstriyel uygulamalar dünyada yaygın olmakla birlikte, ülkemizde de mevcuttur. Bu bağlamda piroliz ile karbon karası üretimi için teknolojik hazırlık seviyesinin “9” olduğu söylenebilir.

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Ülkemizde, üniversitelerde gerçekleştirilen devulkanizasyon konulu çalışmalara örnek olarak Kocaeli Üniversitesi’nde 2017 yılında tamamlanan “EPDM esaslı atıkların bitüm varlığında mikrodalga enerjisi ile devulkanizasyonu” başlıklı TÜBİTAK 1001 projesi ve yine ülkemizden Kocaeli Üniversitesi ile Arçelik, Almanya’dan Faunhofer Enstitüsü ICT ve Saargummi’nin ortak

olduğu “EPDM kauçuk atıklarının ultrasonik ekstrüzyon ile devulkanize edilerek geri kazanımı” konulu ve 2019 yılında tamamlanan TÜBİTAK ikili işbirliği projesi verilebilir. Her iki projede de devulkanizasyon başarısı mevcut uygulamalara göre önemli ölçüde geliştirilmiş ve THS 4-5 seviyesine taşınmıştır.

Sanayi kuruluşları tarafından benzer kapsamda gerçekleştirilen projeler arasında bilinen örnek, Derby Konveyör Bant San. Tic. A.Ş. tarafından 2020 yılında tamamlanan “Ömrünü tamamlamış lastiklerin ve kauçuk sanayi atıklarının verimli devulkanizasyon ile geri kazanımı” başlıklı TEYDEB 1511 projesi verilebilir. Bu projede de THS 6 seviyesine ulaşılabilmektedir.

Macaristan-Türkiye ikili işbirliği kapsamında başvuru yapılan ve halen değerlendirme aşamasında olan, yine alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasıyla devulkanizasyon konulu bir projenin de olduğu bilinmektedir.

Maalesef, söz konusu projelerden hiçbiri ilave çalışma fırsatı/bütçesi bulunamaması veya yatırım noktasındaki mali engeller nedeniyle henüz endüstriyel boyutuna geçemeyen projelerdir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Dünyada bu alanda raporlanan uygulamalar arasında en başarılısı, Michelin firması tarafından kurulan “Scandinavian Enviro Systems” rCB (recovered carbon black) üretim sistemleridir. Bu proseste, ÖTL’den başlanarak piroliz yolu ile karbon karası üretilmektedir. Elde edilen karbon karası, lastik endüstrisi tarafından, standart karbon karaları ile kısmen yer değiştirilerek kullanılabilir niteliktedir. Patentli bir teknoloji olması nedeniyle kapsamı hakkında açık literatürde bilgi bulunmamaktadır.

Ülkemizde de kurulu çok sayıda fakat görece düşük kapasitede çalışan piroliz tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerde temel hedef pirolitik yağ üretimidir. Piroliz ürünü olarak elde edilen karbon karasının takviye edici özellikte olmadığı iyi bilinmektedir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Hedeflenen teknolojik gelişmenin sağlanabilmesi için öncelik sıralamasına göre, Polimer Bilim ve Teknolojisi alanında çalışan Kimya Mühendisliği, Malzeme Mühendisliği, Kimya Bölümü, Makine Mühendisliği ve Elektrik/Elektronik Mühendisliği alanlarında uzmanların bir araya gelerek çalışılması önerilmektedir. Devulkanizasyon sürecinin başarısını belirleyen kimyasal süreçlerin geliştirilmesi amacıyla Kimya Mühendisliği, Malzeme Mühendisliği ve Kimya Bölümü temelli uzmanların, devulkanizasyon sistemlerinin ekipmanlarının yüksek verimde çalışabilecek şekilde tasarlanması noktasında Makine Mühendisliği temelli uzmanların, alternatif enerji uygulamalarında (mikrodalgı, ultrasonik enerji) ise Elektrik/Elektronik Mühendislerinin katkılarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Gerek atığı üreten, gerekse de devulkanizasyon sonrası kullanacak olan kuruluşların kauçuk sektöründen olmaları nedeniyle, bu alanda gerçekleştirilecek çalışmaların da temel öznesinin yine kauçuk esaslı malzeme üretim sektöründen olması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, kauçuk esaslı malzemeleri büyük hacimlerde ve/veya kritik bileşenlerinde kullanan, otomotiv ve beyaz eşya sektöründen kuruluşların da çalışmaların paydaşları arasında yer alabileceği düşünülmektedir.

Devulkanizasyon proses ekipmanlarının tasarımı, alternatif enerjilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilecek devulkanizasyon sistemlerinin optimizasyonu alanlarında makine tasarım ve imalatı ve elektronik cihaz tasarım sektörlerinden katkı alınabilir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Hedeflenen teknolojik gelişmenin sağlanabilmesi için öncelik sırasına göre Kimya Mühendisliği, Makine Mühendisliği ve Kimya alanlarında uzmanların bir araya gelerek çalışması önerilmektedir. Bu uzmanların hem piroliz proseslerini çok iyi bilmeleri, hem de elde edilecek karbon karasının kauçuk hamurlarında kullanımının çok yönlü etkileri açısından değerlendirilebilmeleri gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Kauçuk sektöründe yer alan kuruluşların çoğunun küçük ve orta ölçekli kuruluşlar olması ve çoğunlukla konservatif yaklaşımlarla yönetildikleri düşünüldüğünde, otomotiv ve beyaz eşya

sektöründeki kuruluşlar gibi Ar-Ge kültürü görece daha yaygın, ekonomik güç sayesinde daha yüksek bütçeli çalışmalara eşlik edebilecek kuruluşların projelerde yürütücü güç olması sağlanabilir. Büyük ölçekli bu kuruluşların, uygulama becerisine sahip fakat daha küçük ölçekteki kauçuk malzeme üreticileri ve üniversite ve enstitülerden çalışmaya dahil edilecek araştırmacılarla birlikte üç ayaklı çalışma modelleri, söz konusu alanda hızlı ilerleme kaydedilebilmesi için örnek model olarak düşünülebilir.

Proje paydaşlarının farklı ekonomik güç ve Ar-Ge yetkinlikleri dikkate alınarak bağımsız projeler yerine, eşgüdüm içinde yürütülen, görev dağılımı net olarak belirlenmiş ve tek elden denetlenen bir proje formatının tercih edilmesi önerilmektedir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Piroliz alanında yatırım yapan kuruluş profilleri mevcut durumda değerlendirildiğinde, hedeflenen teknolojik gelişmenin bu hali ile elde edilmesi ihtimali zayıf görünmektedir. Geliştirilecek projelerde, yatırımcı kuruluşların bu alanda araştırma yapan merkezlerle bir araya getirilmesi kesinlikle önerilmektedir.

Piroliz ürünü karbon karasının kauçuk hamurlarında kullanılabilirliğinin çok yönlü değerlendirilebilmesi için, statik ve dinamik, kısa ve uzun dönem, hamur aşaması ve vulkanizasyon sonrası olmak üzere oldukça kapsamlı analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum dikkate alındığında, hem test-analiz altyapısı açısından, hem de bünyesinde söz konusu çok yönlü değerlendirmeyi yapabilecek yetkinlikte araştırmacılar bulunan kuruluşların yer aldığı orta/büyük ölçekli Ar-Ge ve yenilik projelerinin geliştirilmesi tercih edilmelidir.

Proje paydaşlarının farklı alanlarda faaliyet gösteren ve birbirlerinin yetkinliklerine mutlaka ihtiyaç duyacak gruplar olduğu düşünülerek, bağımsız ve görece küçük kapsamlı projeler yerine eşgüdüm içinde yürütülen, görev dağılımı net olarak belirlenmiş bir proje formatının tercih edilmesi önerilmektedir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

8.1.a. Kauçuk esaslı sanayi atıklarından, ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) devulkanizasyon yöntemiyle kauçuk hamurunun geri kazanımı

Proje paydaş sayısının birden fazla oluşu ve araştırma sonuçlarının endüstriyelleşme boyutunun da projeye dahil edileceği ideal modelde, proje süresi olarak yaklaşık 3 yıl uygun bir süredir.

Söz konusu kritik teknoloji, kısa ve orta vadede hedeflenmelidir. Zira, proje paydaşı olabilecek kauçuk malzeme üreticilerinin sektörel büyüklükleri ve araştırma bütçeleri göz önüne alındığında, projelerinin kısa ve orta vadede uygulanabilir konular üzerine yoğunlaşması tercih sebebidir.

Bu alanda yapılabilecek araştırmalarda kullanılacak, özellikle de karakterizasyon sistemlerinin yüksek maliyeti, tamamının ithalat yoluyla karşılanabileceği ve güncel kur seviyeleri değerlendirildiğinde, 3.000.000 TL'nin altında bir Ar-Ge bütçesinin araştırma sürecinde yetersiz olacağı düşünülmektedir.

Demonstrasyon ya da prototip doğrulama için ana devulkanizasyon sistemi ve yan sistemlerinin (mil, konveyör gibi) yatırımı zorunludur. Bu yatırımın en az Ar-Ge maliyeti kadar olacağı düşünülmektedir.

Devulkanizasyon sisteminin endüstriyel boyutta ve uygun kar seviyelerini sağlayabilecek bir kapasitede çalışabilmesi için öğütülmüş atıktan devulkanizasyon ürününe geçiş için ihtiyaç duyulacak yatırım, 20.000.000 TL'nin üzerinde olabilecektir.

8.1.b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden (ÖTL) ve alternatif kaynaklardan karbon karası üretim proseslerinin geliştirilmesiyle elde edilen karbon karasının kauçuk hamurlarında, standart karbon karasına eşdeğer performans sağlayacak şekilde kullanımının sağlanması

Proje paydaş sayısının birden fazla oluşu ve araştırma sonuçlarının endüstriyelleşme boyutunun da projeye dahil edileceği ideal modelde, proje süresi olarak yaklaşık 3 yıl uygun bir süredir.

Söz konusu kritik teknoloji, kısa ve orta vadede hedeflenmelidir.

Bu alanda yapılabilecek araştırmalarda kullanılacak, özellikle de karakterizasyon sistemlerinin yüksek maliyeti, tamamının ithalat yoluyla karşılanabileceği ve güncel kur seviyeleri değerlendirildiğinde, 5.000.000 TL'nin altında bir Ar-Ge bütçesinin araştırma sürecinde yetersiz olacağı düşünülmektedir.

Piroliz sistemlerinin ölçek değişimlerinden çok etkilendiği düşünüldüğünde, en az pilot ölçekli bir sistemin kurulumu gerekebilecektir. Bu yatırımın 25.000.000 TL'nin üzerinde bir maliyetinin olacağı düşünülmektedir.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kauçuk kökenli atıkların önemli bir kısmının hala tehlikeli atık sınıfında yer alması ve ithalatının özel kısıtlamalara tabi olması, yurt içinde de atık toplama ağındaki düzensizlikler nedeniyle hammadde miktar ve kalite sürekliliğinin sağlanması dikkate alınacak en önemli konular arasındadır. Ülkemiz kauçuk sektöründeki yetersiz insan kaynağı altyapısı ve genel olarak konservatif yönetim tarzı yine aşılması gereken önemli bir engel olarak görülmektedir. Söz konusu alanlarda kamusal desteğe mutlaka ihtiyaç duyulacaktır.

Eğer büyük ölçekli kauçuk eşya kullanıcıları (otomotiv ve beyaz eşya sektörü gibi) ile görece küçük ölçekli kauçuk malzeme üreticilerinin bir araya getirilmesi mümkün olursa, devulkanizasyon araştırmaları için hem üretim, hem de karakterizasyon ve sertifikasyon altyapısı, proje kapsamında yapılacak makul desteklerle kusursuz hale getirilebilir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Teknik Altyapılar

Geliştirilen projelerde lastik üreticileri ve büyük ölçekli kauçuk malzeme üreticilerinin yer alması sağlanabilirse, üretilecek karbon karasının çok yönlü değerlendirilmesi için gerekli test-analiz altyapısının kullanımı mümkün olabilecektir. Karakterizasyon ve sertifikasyon altyapısı, proje kapsamında yapılacak makul desteklerle kusursuz hale getirilebilir.

İnsan Kaynakları

Kauçuk sektöründe, konu üzerinde bilimsel derinlikte etkinliği olan beyaz yaka personel sayısı ciddi şekilde yetersizdir. Az sayıda üniversitede Kauçuk bilim ve teknolojisi alanında araştırmalar yapılmakta ve verilen seçmeli derslerle, kauçuk sektörüne insan kaynağı sağlanmaya çalışılmaktadır. Üniversitelerde bu alanda gerçekleştirilen araştırmalara ihtiyaç duyulan desteğin sağlanması, yine bu alanda çalışan dernek ve kuruluşlara yürütülen gönüllü faaliyetlerde destek verilmesi, ihtiyaç duyulan insan kaynağının daha kısa sürede tamamlanması için faydalı olacaktır.

Destek ve Teşvikler

Yeşil dönüşüm kapsamında, üretilen tüm ürünlerde geri dönüşüm kökenli malzeme kullanım oranlarına göre değerlendirilerek kuruluşların yatırımlarında süreli vergi indirimleri ve/veya kısmi hibeler ile sürece destek olunabilir. Maddi kazanç boyutunun özendirici olması durumunda, konuya olan ilginin artması ve yaratıcı çözümlerin ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Ülkemizde halen çok sayıda piroliz işletmesinin çevre dostu olmayan uygulamaları ve katma değeri görece düşük olan ürünler ürettikleri bilinmektedir. Piroliz ürünlerinin yüksek katma

değerli hammaddelere dönüştürülmesi durumunda, diğer piroliz uygulamalarından farklı teşviklerle desteklenmeleri bu alanda ilerlemeyi hızlandırabilecektir.

Kritik Ürün/Teknoloji 8.2.

8.2. Doğal kauçuk ve karbon siyahı yerine kullanılabilir daha çevre dostu alternatif ürünlerin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

8.2.a. Taraxacum kok-saghyz (TKS) kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

8.2.b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Kritik Ürün/Teknoloji 8.2.

8.2. Doğal kauçuk ve karbon siyahı yerine kullanılabilir daha çevre dostu alternatif ürünlerin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

Kauçuk hamurlarında yer alan temel bileşenler; kauçuk matris, dolgu maddeleri, proses kolaylaştırıcılar, yaşlanma önlemede etkili stabilizörler, aktivatörler ve çapraz bağlayıcı sistem olmak üzere sıralanabilir. Doğal kauçuk ve özel uygulamalarda kullanılan doğal yağlar dışında, kauçuk hamuru bileşiminde kullanılan bileşenlerin tamamı petrol ve doğal gaz gibi yenilenemeyen kaynaklardan sentetik yollarla üretilen maddelerdir. Bu maddelerin çoğu, ayrıca üretimleri ve hatta kullanımları sırasında da çevresel anlamda ciddi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Doğal kauçuk ise, sınırlı coğrafi bölgelerde yetişen ve çok büyük alanlara ihtiyaç duyması dolayısıyla Dünya'nın akciğeri konumundaki bölgelerde ormansızlaştırmaya yol açan bir üretim sürecine sahiptir. Hammadde tipi ayrımı yapılmaksızın her birinin yenilenebilir kaynaklardan, ürün yaşam döngüsü boyunca karbon ayakizi düşük ve ekonomik yollarla eldesi, kauçuk esaslı malzemelerin sürdürülebilir üretimine ve çevreye olumsuz etkilerinin giderilmesine katkı sağlayabilecektir.

Kauçuk esaslı malzemeler, araç lastiğinden pencere-kapı profillerine, otomotiv conta ve hortumlarından, raylı sistemlerde kullanılan süspansiyon elemanlarına kadar geniş bir alanda hayatımızda önemli bir yer kaplamaktadır. Bu malzemelerin tüketimi, gelişen teknoloji ve artan nüfus ile günden güne artmaktadır. Bu durum, kauçuk malzemelerin üretiminde kullanılan bileşenlerin kullanım miktarlarını da arttırmaktadır. Sürdürülebilir üretim ve temiz çevre gibi kavramların artık hayatımızın bir parçası haline geldiği, ayrıca tedarik süreçlerinin zorlaştığı günümüzde, yaygın kullanılan bu hammaddelerin ya da aynı fonksiyonu sağlayabilecek alternatiflerinin, ülkemizde kısıtlı miktarda bulunan yenilenemeyen kaynaklar yerine kısmen veya tamamen, görece kolay ulaşılabildiğimiz ve sahip olduğumuz doğal kaynaklardan üretimine yönelik çalışmalara olan ihtiyaç aşikardır. Bu alanda sağlanabilecek en küçük gelişmenin bile, sürdürülebilirliğin yanı sıra zaman zaman tedarik güçlüğü nedeniyle durma noktasına gelen üretim alanlarımızın sürekliliği açısından da oldukça önemlidir.

Kauçuk hamurlarında kullanılan bileşenlerin büyük çoğunluğu katı fazda olan, karıştırma sıcaklıklarında uygun dağılım sergileyebilen, vulkanizasyon sıcaklıklarında buhar faza geçmeyen ve malzemenin servis ömrü boyunca anlamlı oranda yüzeye göçmeden kalıcı fonksiyon sağlayabilen maddelerdir. Katkı maddelerinin faydalı olarak kullanılabilmesi için, bu

özelliklerin tamamını karşılamanın yanı sıra kauçuk hamuru içerisinde kolay dağıtılabılır olması gerekmektedir. Bu amaçla, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilecek katkı maddelerinin, kauçuk hamurunda bulunması faydalı olabilecek diğer katkı maddeleriyle ön işleme tabi tutularak etkinliklerinin artırılması üzerinde çalışılabilir. Çapraz bağlayıcı olarak etki sağlayabilecek toz formda bir doğal katkının proses yağı ile ön karıştırılarak dağılımının iyileştirmesi bu uygulamaya örnek olarak verilebilir.

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

8.2.a. Taraxacum kok-saghyz (TKS) kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

2021'de toplam tabii kauçuk tüketimi yaklaşık 14 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bunun tamamı, Hevea Brasiliensis isimli, tropik iklimde yetişebilen bir ağacın lateksinden üretilmiştir. Anavatanı Güney Amerika olan bu ağaç, tarlalara hızla yayılan hastalığa, çok dar olan gen havuzu karşı koyamadığı için bugün Güney Amerika'da kalmamıştır. Ekildikten 7 yıl sonra lateks vermeye başlayan kauçuk ağacı, bugün dünyada tropik orman büyüyecek toplam 20 milyon hektara yakın yer kaplamaktadır.

Tabii kauçuk özellikle araç lastiği yapımında olmazsa olmaz bir hammaddedir. 2017 yılında AB kritik hammaddeler listesine, 27 maddeden biri olarak girmiştir. II. Dünya Savaşı'nda Japonya Güney Asya'daki kauçuk tarlalarına el koyunca, ABD ve müttefikleri savaş uçaklarını kaldıramayacak duruma gelmişlerdir. O dönemde alternatif doğal kaynaklardan tabii kauçuk üretimi çalışmaları başlatılmış olsa da, savaşın kazanılması sonrası bu çalışmalar beklemeye alınmıştır. Son yıllarda ise gerek yeşil dönüşüm perspektifi, gerek mevcut Hevea Brasiliensis tarlalarında yayılacak yeni bir hastalığın küresel arza etkileri hakkında endişeler, gerekse bu stratejik ürünü kendi ülkelerinde üretebilme arzusu ile bir çok gelişmiş ülke iki farklı tabii kauçuk kaynağı üzerinde çalışmalar yapmaktadırlar.

Guayule olarak bilinen Parthenium Argentatum, oldukça kurak bölgelerde yetişebilen bir çalı türüdür. Guayule köklerinden, alerjen proteinler içermeyen lateks ve kauçuk üretimi ile mümkündür. Fakat hektar başına düşük üretim performansı, bir çok araştırmacının başta umut veren bu bitkiden uzaklaşmasına yol açmıştır.

Taraxacum kok-saghyz (TKS, aynı zamanda kauçuk karahindiba, Rus veya Kazak karahindiba olarak da bilinir), 1930'ların başında alternatif bir doğal kauçuk kaynağı olarak tanımlanmış ve ılıman bölgelerde yerli kauçuk ekimi için uygunluğu tespit edilmiştir. Makromoleküler yapı ve bileşim açısından Hevea brasiliensis'e çok benzeyen ve cis-1, 4-poliizopren kauçuk üreten

TKS, modern tarım teknikleri kullanılarak yönetilebilen yıllık bir üründür. Ancak Karahindiba bitkisinde ayırma ve saflaştırma işlemleri halen büyük büyük bir problemdir. Kauçuğun kaliteli bir şekilde ayrılması ve ticari sektörlere değerli hammadde ve / veya ürüne dönüştürülmesi gerekir. TKS kökünden kauçuk lateksinin yanısıra, ethanole dönüştürülebilecek inulin de elde edilebilmektedir.

Alternatif kaynaklardan tabii kauçuk elde edilmesi, stratejik, multidisipliner ve çok maliyetli bir çalışmadır. Özellikle Avrupa'da yıllardır bitkinin en verimli hale getirilmesi için çalışmalar sürdüren kurumlar ve birlikler mevcut. Günümüz itibariyle ülkemizde de bu yeşil ürünün üretilebilmesi için en doğru adım, mevcut bitkilerin köklerinden en verimli şekilde kauçuk elde edilmesi üzerine çalışmalar yapmak olacaktır. Elde edilen ham kauçuktan üretilecek malzemeler, statik ve dinamik mekanik değerler, ısı dayanımı, vulkanizasyon verimi gibi alanlarda alışlagelmiş yöntemlerle üretilmiş tabii kauçuk ile kıyaslanmalıdır.

8.2.b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Kauçuk hamurlarında sentetik alternatifleriyle değiştirilerek kullanılacak özellikte doğal ve/veya yenilenebilir katkı; antioksidan ya da antiozonant özellik gösterebilecek maddeler, kauçuk hamurlarında yapışkanlığı ya da mekanik özellikleri geliştirebilecek doğal reçineler, takviye amaçlı kullanılacak doğal lifler, proses kolaylaştırıcı görevi yapabilecek doğal yağlayıcılar, çapraz bağlayıcı özellik gösterebilecek maddeler sayılabilir. Bu maddeler, tercihen doğadan alındıkları şekilleriyle veya basit fiziksel işlemlerle kullanılabilir forma getirilebilmelidirler. Kauçuk proseslerinde işlenebilir özellikte olmalı, yumuşama ve buharlaşma sıcaklıkları, ilgili proseslerde kullanıma uygun olmalıdır. Kauçuk hamurundaki tüm bileşenlerin dispersiyon durumları malzemenin gerek proses, gerekse kullanım sırasındaki özellikleri açısından son derece önemlidir; bu bağlamda doğal ve/veya yenilenebilir kaynaklardan sağlanan maddelerin hamurda iyi disperse edilebilir özellikte olmaları gerekmektedir. Bu davranışı geliştirmek amacıyla proses yağı ya da dolgu maddeleri gibi diğer hamur bileşenleri ile, ya da doğrudan kauçuklarla ön karışım (masterbatch) formunda hazırlanarak kullanımları çalışılabilir [19-21].

Doğal ve/veya yenilenebilir katkı maddelerinin, kauçuğun vulkanizasyonu sırasında reaksiyonun gecikmesine neden olabilecek pH seviyelerinde olmamasına dikkat edilmeli, ya da asidik yapıda olmaları durumunda mümkünse yine doğal yollarla nötralize edilerek

kullanılmalıdır. Benzer şekilde vulkanizasyon sırasında oluşan ve reaksiyonun devamlılığı için ihtiyaç duyulacak radikalik ara türleri sönmleme eğilimlerinin olmamasına dikkat edilmeli, böyle bir durumda hamura katılma sırası, sıcaklığı ve/veya katılma aşamasındaki hamur viskozitesi, özetle proses detaylarının optimize edilmesine yönelik çalışılmalıdır.

Literatürde benzer amaçlarla yapılan çok sayıda çalışma olmasına rağmen, gerek kauçuk sektörünün konservatif yapısı, gerekse de katkıların adı geçen proses optimizasyonu açısından değerlendirmelerine yönelik kapsamlı çalışmaların eksikliği nedeniyle bu keşiflerin büyük kısmı ticarileşmemiştir. Bunun yanı sıra, doğal ve/veya yenilenebilir katkıların ülkemiz sınırlarında bol bulunur ve kolay ulaşılabilir olması, ulusal kazanımlar açısından ön planda tutulmalı, bu koşulu sağlayan çalışmalara öncelik verilmelidir.

B. Dünyada ve Türkiye’de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

8.2.a. TKS kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya’da	Türkiye’de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Türkiye’de faaliyette bulunulmamaktadır.

TKS biyolojisi, fizyolojisi ve genetiği ile ilgili bazı ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, yakın zamana kadar tür çeşitliliği ve ilgili özelliklerin kalıtımı/etkileşimi hakkında yalnızca sınırlı bilgi mevcuttur. Günümüzde yapılan birçok çalışma, kök ve yaprakların morfolojik özellikleri ve yüksek kauçuk verimi ile doğrudan ilişkili fenotip tanımlamaları üzerinedir. Ayrıca TKS yabancı otlarla da rekabet eder. Bu durumun üstesinden gelmek için, seçim, transgen yerleştirme ve gen düzenleme dahil olmak üzere çeşitli yollarla herbisite dayanıklı TKS germplazmının geliştirilmesi üzerine çalışmalar vardır. Germplazmların potansiyel salınımı, TKS ile her yerde

bulunan yabancı ot akrabası, ortak karahindiba, Taraxacum officinale (TO – Türkiye de en çok bulunan tür) arasındaki gen akışı üzerine de yapılmış birçok çalışma mevcuttur.

Örneğin yapılan bir çalışmada, 20 türün 17.450 tohumluk alt örneklerinden yetiştirilen birkaç bin bitkinin açık tozlaşmasıyla oluşturulan bir popülasyondaki fenotip çeşitliliğini tanımlanmıştır.

Kök bileşenlerin kantifikasyonu için düşük maliyetli, yüksek verimli ve güvenilir yöntemler bulunması yüksek önem arz etmektedir.

TKS kökünde bulunan kauçuk genellikle polar olmayan organik solventler kullanılarak reçinelerle birlikte ekstrakte edilir, (mekanik bazı yöntemlerde kullanılabilir) polar bir organik solvent ile çökeltme yoluyla izole edilir ve daha sonra gravimetrik veya spektrofotometrik yöntemlerle miktarı belirlenir. Ayrıca yüksek basınçlı sıvı ekstraksiyonu olarak da adlandırılan hızlandırılmış solvent ekstraksiyonu (ASE), katı numuneleri yalnızca yüksek basınçta veya yüksek sıcaklıklarla birlikte solventlerle ekstrakte etmek için kullanılan ve kantitatif, verimli ve hızlı ekstraksiyona izin veren bir yöntemdir.

Kök hazırlama, ekstraksiyon sıcaklığı ve süresinin, numune boyutunun, ekstraksiyon sırasının ve ekstraksiyon sayısının ekstraksiyon verimliliği ve inülin, reçineler ve kauçuğun miktar tayini üzerindeki etkilerinin araştırılması ve olası izolasyon yöntemlerinin optimize edilmesi elzemdir.

8.2.b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünya'da	Türkiye'de
THS1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

THS8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ülkemizde, kauçuk bilim ve teknolojisi alanında yapılan akademik çalışmaların toplamda sınırlı olması, kauçuk hamurunda kullanılabilecek doğal ve/veya yenilenebilir katkı maddeleri üzerine yapılan çalışmaların da sınırlı olmasını beraberinde getirmektedir. Halen tamamlanan çalışmalar arasında, öğütülmüş kınanın doğal kauçuk esaslı hamurlarda antioksidan olarak kullanımı ve sığla ağacından elde edilen doğal reçinenin, kauçuk hamurlarının polimerik elyaf ve metallere yapışma özelliğinin geliştirilmesinde kullanıma yönelik çalışmalar yapılmış ve uluslararası literatürde yayınlanmıştır. Bununla birlikte, iki çalışma da proses edilebilirliğin geliştirilmesine yönelik büyük ölçekte hamur hazırlama ve malzeme üretimi aşamalarında değerlendirilmemiştir. Bu bağlamda, her iki çalışmanın da THS 3-4 seviyesinde olduğu söylenebilir.

Dünyada benzer kapsamda yapılan çalışmalarda, palmye yağının kauçuk hamurlarında kullanılmak üzere üretildiği, kaju fıstığından elde edilen reçinenin işlenmesi sonrası kauçuk hamurlarında takviye edici reçine olarak kullanıldığı bilinmektedir. Her iki uygulama da THS 9 seviyesindedir. Bunların yanı sıra, üzüm çekirdeğinin, palmye yaprağından, deniz canlılarının kabuklarından, propolisten ve tavuk tüyünden antioksidan eldesine yönelik çalışmalar vardır. Bu çalışmalar da THS 3-4 seviyesindedir.

C. Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

8.2.a. TKS kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

Dünya üzerinde birçok araştırma grubu, üniversite ve kauçuk sektörünün lider endüstrileri doğal kauçuğa alternatif oluşturabilecek bitkiler üzerine çalışmalarına devam etmektedir.

Bitki ve AB'nin mevcut çalışmaları hakkında hızlı ve görsel bilgi almak için CNN'in 2013 Şubatı'nda TKS hakkında yaptığı belgeseli şuradan izleyebilirsiniz: <http://edition.cnn.com/2013/02/14/tech/dandelion-tires-latex-biotech/> Videodaki Keygene firması, TKS'nin teknik ve ekonomik potansiyelini araştırmak için Şubat 2014'te başlatılan, Drive4EU isimli 7 senelik Horizon2020 programında yer alıyor. Bu projeden önce de 2012'de bitmiş olan EU-PEARLS isimli, hem guayule hem de TKS'nin değerlendirildiği Horizon2020 projesi çoğunlukla aynı ekip tarafından yapılmış.

Bu projeler haricinde Almanya Continental'in üç araştırma enstitüsü ile ortaklaşa yaptığı bir TKS çalışması var. Bu proje ile 2014'te ilk lastikleri üretilip test etmeye başladılar, ve Temmuz ayı içerisinde ödül aldılar. Tabii kauçuk ağaçlarının üretiminin iki katı üretim yapabildiklerini iddia ediyorlar. Firma bu konu için 2017 yılında araştırma ve test laboratuvarına 35 milyon € yatırım yapmış, tesis 2018'de faaliyete geçmiştir. Ayrıca Mecklenburg-Batı Pomeranya Eyaleti, araştırma projesini 11.6 milyon € destekte bulunmuştur.

ABD'de Ohio Eyalet Üniversitesi'nin önderliğinde bir grup da TKS üzerinde çalışmalarını hazırladıkları eğitici videoda anlatmış. Şu an 1.7 ton/hektar*yıl katı kauçuk alabildiklerini ve tahmini olarak en fazla 800 \$/ha ekim masrafı olacağını iddia ediyorlar.

Ülkemizde de İKMİB tarafından yapılan 6. Kimya Arge Proje Pazarında sunulan bir projede TKS bitkisinin yetiştirilmesi üzerine çalışmalar yapıldığı ve 2015 yılında çok az sayıda TKS bitki tohumunun yetiştirilmesi üzerine denemeler yapıldığı belirtilmektedir. Projede doğal kauçuğu izole edecek yöntem üzerinden çalışıldığı ve bitki köklerinden doğal kauçuğu %30 oranında elde edildiği belirtilmektedir.

8.2. b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Dünyada kauçuk hamuru bileşenlerinden doğal kauçuk, sentetik kauçuk hammaddeleri, dolgu maddeleri ve proses yağlarının doğal ve/veya yenilenebilir kaynaklardan üretimine yönelik çok sayıda ticari örnek bulunmaktadır. Bu konu başlığı ile örtüşen doğal kökenli proses yağı üretimini İsveç'li Nynas firması 20 yılı aşkın süredir başarılı şekilde gerçekleştirmektedir. Ülkemizde ise bu bağliğin konusu dahilinde olmayan dolgu maddesi üretimi dışında bir girişimin olmadığı bilinmektedir. Çalışmalar, üniversitelerde gerçekleştirilen ve THS 3-4 seviyelerine ulaşmış olan araştırma faaliyetleriyle sınırlıdır.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

8.2.a. TKS kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

Temel olarak aşağıda yer alan başlıklar üzerinden projelendirmeler yapılabilir:

- Botanik, ziraat, biyolog ve kimyagerlerden oluşan bir ekibin bir araya gelerek ülkemizdeki karahindiba türlerinin tespit edilerek gen havuzunun oluşturulması ve ıslah çalışmalarının yapılması.
- Yurtdışında bu çalışmaları yapan Üniversite ve Araştırma grupları ile iletişime geçip, ortak çalışmalar yapılması konusunda görüşmeler yapılması.
- Deneme ekimleri yapılabilmesi için yurtdışından TKS tohumlarının bulunması ve oluşturulan ekip ile bu dikimlerin yapılarak gerekli incelemelerin yapılması.
- Tarım için gerekli olabilecek alet ve işçilik süreçlerinin planlanması. Ayrıca bitkinin yetiştirilme iklim sürecine göre ülkemizde endüstriyel tarıma elverişli alanların tespitinin yapılması.

8.2. b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Hedeflenen teknolojik ilerlemenin sağlanabilmesi için Kimya, Biyoloji, Su Ürünleri Mühendisliği, Ziraat Mühendisliği ve Kimya Mühendisliği bilim dallarından uzmanların bir arada çalışmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Uzmanların etkileşimli çalışarak, kauçuk hamurlarında kullanılan bileşenlerin her birinden beklenen fonksiyonu iyi anlamaları, bu fonksiyonların doğadaki karşılıkları, potansiyel doğal kaynakların bollaştırılmasına yönelik yapılabilecek çalışmaları birlikte değerlendirebiliyor olmaları gerekmektedir.

Katkı maddelerinin kullanıcısı olan kauçuk sektöründen kuruluşların çalışmaların içinde mutlaka yer alması gerekmektedir. Çalışmalara, sayılan uzmanların yanı sıra, doğal kaynağın çeşidine ve ihtiyaç duyulacak ön işlemlere göre ilgili alanda çalışan sektör bileşenlerinin de eşlik etmesi faydalı olacaktır.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

8.2.a. TKS kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa, Çin ve Kanada'da ticari olarak uygun bir ürün olarak TKS'nin geliştirilmesine ilişkin kapsamlı araştırmalar devam etmektedir. Geliştirme çabaları, kauçuk verimini arttırma, agronomik uygunluk, verimli işleme kauçuk, inülin ve yan ürünleri yüksek verim ve saflıkta geri kazanım üzerine odaklanmıştır.

- Yurtdışından temin edilecek TKS tohumları ile ülkemizde deneme ekimleri yapılabilir.

- Ön denemelere başlamış olan alanında lider lastik ve kauçuk üreticileri ile iş birliği projeleri geliştirilebilir.

8.2. b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Konunun doğası gereği çalışmaların sayılan uzmanlık alanlarındaki araştırmacıların öncülüğünde yürütülüyor olması gerekmektedir. Bununla birlikte, çalışmaların endüstriyel uygulamaya yönelik ihtiyaçlar doğrultusunda şekillendirilebilmesi, ancak kauçuk sektöründen katılımcıların varlığı ile mümkündür. Bu kapsamda tanımlanabilecek en az iki disiplinden olmak üzere üniversite ya da araştırma enstitüsü ile en az bir sektör kuruluşunun yer aldığı ortaklı ve eşgüdümlü olarak yürüten proje modelleri önerilmektedir.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

8.2.a. TKS kökünden ham kauçuk izolasyonu yönteminin geliştirilmesi

Proje süreleri min. 24 ay olabilir (iklim koşulları, ekim mevsimi vb. tarımsal etkenler ön planda tutulabilir.)

İzolasyon yöntemlerinin belirlenmesi, verim çalışmaları, kauçuk formülasyon çalışmaları vb. arge çalışmalarının sonuçlarının tam olarak alınabilmesi uzun vadeli bir hedeftir.

Bütçesel olarak min. 3.000.000 TL

8.2. b. Kauçuk esaslı ürünlerin bileşiminde dolgu dışı amaçla kullanılan, sentetik kökenli fonksiyonel katkı maddelerinin (stabilizörler, reçineler, vulkanizasyon sistemi bileşenleri gibi) doğal kökenli, sadece fiziksel veya basit kimyasal modifikasyonlarla kullanılabilir forma dönüştürülebilen alternatifleriyle değiştirilmesine yönelik çalışmalar

Birden fazla disiplin, üniversite/enstitü ve sanayi kuruluşlarının birlikte çalışabileceği proje modellerinin başarılı olabilmesi için 3 yıl süreli projeler yürütülmesi önerilmektedir.

Geliştirilecek teknoloji ya da ürünler üzerinde orta ve uzun vadedeki faydaları gözetilerek çalışılmalıdır.

Proje bütçeleri, saha çalışmalarını da kapsayacağı düşünülerek 5.000.000 TL üzerinde Ar-Ge bütçesi ve aynı seviyede 5.000.000 TL demonstrasyon bütçesine ihtiyaç duyulacağı düşünülmektedir. Yatırım bütçesi ise doğal kaynağın türüne ve elde edilmiş yöntemine göre önemli farklılıklar gösterebileceğinden şu aşamada doğru bir tahmin yürütmek mümkün olmamıştır.

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Çalışma konusunda mevzuat açısından bir sınırlama olmadığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, seçilen kaynakların gıda olarak kullanıma yönelik kaynakları kapsamaması, katkının doğadan izolasyonu sırasında içinde bulunduğu ekosistemde değişime neden olmayacak nitelikte olması gibi uzun vadeli etkilerin kamu tarafından kontrolü son derece önemlidir.

Doğal ve/veya yenilenebilir kaynaklardan elde edilen katkıların kauçuk hamurlarında değerlendirilmesi sırasında gerçekleştirilecek karakterizasyon ve sertifikasyon aşamalarının, sentetik katkıların kullanımı durumuna göre farkı olması beklenmemektedir. Bu bağlamda, proje kapsamında yapılacak makul desteklerle karakterizasyon altyapısının eksiksiz olarak sağlanabileceği düşünülmektedir.

Doğal ve/veya yenilenebilir katılardan, özellikle de ülkemiz sınırlarında bol bulunan ve ulaşılabilen kaynaklardan elde edilenlerin endüstriyel amaçla kullanımı durumunda, üretilen son ürünlerin satışında katma değer vergisi indirimleri gibi özendirici uygulamaların, bu alandaki çalışmaları ivmelendirebileceği düşünülmektedir.

Mevzuat ve Yasal Düzenlemeler

Teknik Altyapılar

Geliştirilen projelerde lastik üreticileri ve büyük ölçekli kauçuk malzeme üreticilerinin yer almasının sağlanması durumunda daha etkin bir test-analiz ve sertifikasyon altyapılarının geliştirilmesi ve kullanımı mümkün olabilecektir. Test ve sertifikasyon altyapılarının geliştirilmesi için belli oranlarda desteklere ihtiyaç vardır.

İnsan Kaynakları

Kauçuk sektöründe, konu üzerinde bilimsel derinlikte etkinliği olan beyaz yaka personel sayısı ciddi şekilde yetersizdir. Az sayıda üniversitede Kauçuk bilim ve teknolojisi alanında araştırmalar yapılmakta ve verilen seçmeli derslerle, kauçuk sektörüne insan kaynağı sağlanmaya çalışılmaktadır. Üniversitelerde bu alanda gerçekleştirilen araştırmalara ihtiyaç duyulan desteğin sağlanması, yine bu alanda çalışan dernek ve kuruluşlara yürütülen gönüllü

faaliyetlerde destek verilmesi, ihtiyaç duyulan insan kaynağının daha kısa sürede tamamlanması için faydalı olacaktır.

Destek ve Teşvikler

Yeşil dönüşüm kapsamında, üretilen tüm ürünlerde geri dönüşüm kökenli malzeme kullanım oranlarına göre değerlendirilerek kuruluşların yatırımlarında süreli vergi indirimleri ve/veya kısmi hibeler ile sürece destek olunabilir. Maddi kazanç boyutunun özendirici olması durumunda, konuya olan ilginin artması ve yaratıcı çözümlerin ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Kaynakça

1. Adhikari, B., De, D., Maiti, S. 2000. "Reclamation and Recycling of Waste Rubber", *Progress in Polymer Science*, 25, 909-948.
2. Myhre, M., Saiwari, S., Dierkes, W., Noordermeer, J. 2012. "Rubber Recycling: Chemistry, Processing, and Applications", *Rubber Chemistry and Technology*, 85(3), 408-449.
3. De, S.K. 2001. "Re-use of Ground Rubber Waste - A Review", *Progress in Rubber and Plastics Technology*, 17(2), 113-125.
4. Basu, P. 2010. "Biomass Gasification and Pyrolysis-Practical Design", Elsevier
5. Karaca, C., Sözen, S., Orhon, D., Okutan, H. 2018, "High Temperature Pyrolysis of Sewage Sludge As a Sustainable Process for Energy Recovery", *Waste Management*, 78, 217-226.
6. Williams, P.T. 2013. "Pyrolysis of Waste Tyres: A Review", *Waste Management*, 33(8), 1714-1728.
7. Nisar, J., Ali, G., Ullah, N., Awan, I.A., Iqbal, M., Shah, A., Sayed, M., Mahmood, T., Khan M.S. 2018. "Pyrolysis of Waste Tire Rubber: Influence of Temperature on Pyrolysates Yield", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3469-3473.
8. Cardona, N., Campuzano, F., Betancur, M., Jaramillo, L., Martinez, J.D. 2018. "Possibilities of Carbon Black Recovery From Waste Tyre Pyrolysis to be Used as Additive in Rubber Goods -A Review", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 437, 012012.
9. Probst, N. ve Loeffler, M. 2011. "Pyrolysis Carbon Black, an Opportunity for the Rubber Industry", Fall 180th Technical Meeting of the Rubber Division of the ACS, 11-13 Ekim, Cleveland, Ohio, USA.
10. Cai, N., Zhang, H., Nie, J., Deng, Y., Baeyens, J. 2020. "Biochar from Biomass Slow Pyrolysis", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 586, 012001.
11. Feng, P., Li, J., Xu, Z. 2020. "Biomass-Based Activated Carbon and Activators: Preparation of Activated Carbon from Corncob by Chemical Activation with Biomass Pyrolysis Liquids", *ACS Omega*, 5(37), 24064-24072.
12. Yildiz, Z. Ve Ceylan, S. 2018. "Pyrolysis of Walnut Shell Biomass in Fluidized Bed Reactor: Determination of Optimum Conditions for Bio-char Production", *Environmental Research and Technology*, 1(4), 47-51.
13. Dick, J.S. 2009. *Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance* (2.Baskı). Cincinnati, USA: Hanser Publications.

14. Donnet, J.B. ve Custodero, E. 2005. "Reinforcement of Elastomers by Particulate Fillers". Science and Technology of Rubber. Ed.: Mark, J.E., Erman B., Frederick, R.E. Burlington, USA: Elsevier.
15. Bockstal, L. Berchem, T. Scmetz, Q. Richel, A. 2019. "Devulcanisation and Reclaiming of Tires and Rubber by Physical and Chemical Processes: A Review", Journal of Cleaner Production, 236, 117574.
16. Saputra, R., Walvekar, R., Khalid, M., Mubarak, N.M., Sillanpaa, M. 2021. "Current Progress in Waste Tire Rubber Devulcanization", Chemosphere, 265, 129033.
17. Asaro, L., Gratton, M., Seghar, S., Hocine, N.A. 2018. "Recycling of Rubber Wastes by Devulcanization", Resources, Conservation and Recycling, 133, 250-262.
18. Wisniewska, P., Wang, S., Formela, K. 2022. "Waste Tire Rubber Devulcanization Technologies: State-of-the-art, Limitations and Future Perspectives", Waste Management, 150, 174-184.
19. Sarkar, P., Bhowmick, A.K. 2018. "Sustainable Rubbers and Rubber Additives", Journal of Applied Polymer Science, 135(24), 45701.
20. Öncel, Ş., Kurtoğlu, B., Karaağaç, B. 2018. "An Alternative Antioxidant for Sulfur-Vulcanized Natural Rubber: Henna", Journal of Elastomers and Plastics, 51(5), 1-17.
21. Öncel, Ş., Alchekh Wis, A., Karaağaç, B. 2021. "Potential Sustainable Antioxidants for Natural Rubber: Henna and its Major Components", Rubber Chemistry and Technology, 94(4), 720-734.

Teknolojik Hedef 9:

**YERLİ KAYNAKLARDAN VE ATIKLARDAN KRİTİK
HAMMADELERİN ÜRETİMİ**

Yarı iletken-nadir toprak elementleri gibi kritik hammaddelerin üretimi ve geri kazanımı/geri dönüşümü/ ileri dönüşümü teknolojilerinin geliştirilmesi

Kritik Ürün/Teknoloji 9.1.

9.1. Yerli Kaynaklardan ve atıklardan geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi

Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik Konuları

- 9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.**
- 9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.**
- 9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan kilerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması**
- 9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri**

Kritik Ürün/Teknoloji 9.1.

9.1. Yerli Kaynaklardan ve atıklardan geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi

A. Teknik Açıklamalar, Yenilikçi Özellikler, Hedeflenen Performans ve Metrikler

ÖNCELİKLİ AR-GE VE YENİLİK KONULARI

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.

Küresel olarak, nüfus artışıyla birlikte günlük enerji talebi de artmaktadır. Dünya çapında elektriğe erişimi olmayan tahmini insan sayısı 1,1 milyar seviyelerindedir ve bunların yaklaşık %84'ü kırsal topluluklarda yaşamaktadır. Bununla birlikte, geleneksel biyokütle yakıtına bağımlı olan kırsal kesimdeki insan sayısının 2030 yılına kadar 2,7 milyardan 2,8 milyara çıkacağı tahmin edilmektedir.

Gelişmekte olan ülkelerde, biyokütle daha çok enerji elde etmekte kullanılmaktadır. Ancak çevreye verilen zararlardan dolayı (artan hava kirliliğini ve kanserojen olması) biyokütlenin yeni uygulamaları beklenmektedir. İklim koruma politikaları kapsamında 2050 yılına kadar CO₂ emisyonunun sıfırlamak için (nötr) biyokütle kullanımı ve atık yönetimi umut verici bir strateji olarak görülmektedir.

Tarımsal atıkların bertaraf sistemi, üretilen tarımsal atık maddelerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Atık bertarafı ve kirlilik ayrılmaz bir şekilde ilişkilidir. Son yıllarda, bu kapsamda oluşan atıkların çevreye herhangi bir tehdit oluşturmayarak nasıl bertaraf edilebileceği konusuna odaklanılmaktadır. Günümüzde, çeşitli atık veya tarımsal atık bertaraf sistemlerine rehberlik etmek için farklı çevre koruma yasaları ve yönetmelikleri çıkarılmıştır. Anlık olarak, bazı bertaraf sistemleri diğerlerinden daha fazla uygulanmaktadır ve bu, bertaraf maliyeti, çevre dostu olma, atığın özellikleri, atığın gelecekteki kullanımı için temel ihtiyaçlar ve diğer birçok faktör gibi belirli faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte, atık gömme/katı atık sahası, yakma, kompostlama ve geri dönüşüm gibi tarımsal atık bertarafına uygulanabilecek çeşitli sistemler bulunmaktadır.

Tarımsal atıkların toprağa gömülmesi, atık bertarafında ucuz bir teknik olarak görülmektedir ancak bununla ilişkili çevresel zorluklar bulunmaktadır. En yaygın sorun, yeraltı suyu kirliliğidir. Yakma, atık yakımı altında sınıflandırılmasına rağmen, prosesin küçük bir alan kaplaması avantajdır, ancak pahalı ekipman gerektirmekle birlikte ciddi hava kirliliğine neden olmaktadır. Kompostlama, tarımsal atık bertarafının başka bir seçeneğidir ve toprak besinini artıran ve inorganik atık bertaraf etme yöntemlerine tercih edilen mikrobiyal eylemleri içermektedir. Geri dönüşüm ise dünya çapında güncel bir konu olmakla birlikte tarımsal atıkların geri dönüştürülmesi ile yüksek katma değerli malzemeler geri kazanılabilmektedir.

Güneş enerjisi kullanımı, öncelikle enerji sorununu ele almak için yenilenebilir alternatif enerjide araştırma ve bilimsel ilgiye eğilimi artırmıştır. Enerji sorunu nedeniyle güneş pili uygulamaları için silikon nano parçacıklarının kullanımı ise küresel olarak umut verici bir seçenek haline gelmiştir. Silikadan üretilen nanosilikon, biyolojik, endüstriyel, elektronik gibi birçok uygulama için kullanılabilir. Elektronik uygulamalarda transistörlerin, güneş pillerinin, yarı iletken dedektörlerin imalatında kullanılmaktadır. Cam yüzeyler üzerindeki yüksek kaliteli ince film kristal silikon katmanlardan yapılan güneş modülleri, fotovoltaik elektriği önemli ölçüde ucuza getirme potansiyeline sahiptir.

Silikon, yer kabuğunun önemli bir elementidir. Silisyumun birincil cevher kaynağı olan silis kumu bol miktarda bulunur ve işlenmesi kolaydır. Silika mineralleri kuvarsit, tridimit, metamorfik, kristobalit ve silis polimorfları gibi minerallerle anılır. Silisyum ve oksijenin birleşimine silikat denir ve yer kabuğunun %90'ı silikat minerallerinden oluşur. Silikon metal, silika (silikon dioksit, SiO₂) ve kok kömürü, kömür ve talaş gibi karbon malzemelerinin reaksiyonundan elde edilir. Saf silikon, silikon dioksitin karbon ile 2200°C'ye yaklaşan sıcaklıklarda ısıtılmasıyla üretilir. Silikon oldukça saf elde edilebilir. Özel teknikler ile %99.9999 saf Si-28 olan silikon üretilebilir.

Güneş pilinin temel bileşenlerinden biri silika veya silisyum dioksittir (SiO₂). Silisyum dioksit, güneş ışığını absorplayan yarı iletken bir bileşendir. Bununla birlikte, yarı iletken malzemeler maliyetli işlemler gerektirdiğinden, mevcut güneş pilleri de nispeten yüksek fiyata sahiptir. Bu nedenle, aynı işleve sahip bileşenleri uygun maliyetli ürünlerle değiştirmek gerekmektedir. Pirinç kabuğundan elde edilen kül, çok yüksek silika içeriğine sahip çevre dostu bir silikon kaynağıdır. 700-900 °C'de yakılan pirinç kabuğu, %87-97 oranında yüksek silika ve yaklaşık %16-25 oranında küle sahiptir. Genel olarak pirinç kabuğu külünün silika içeriği %94-96 seviyelerindedir. Bu nedenle, pirinç kabuğu potansiyel olarak güneş pili üzerinde yarı iletken bir malzeme olarak kullanılabilir. Silika eldesi için hammadde olarak pirinç kabuğu külünün seçimi, pirinç üretiminin fazla olduğu yerlerde önemli bir gıda maddesi olarak çeltik üretimi ile uyumludur. Üretilen pirinç bitkisinin besin ihtiyacı olarak kullanılmayan kısımları vardır. Çiftçiler tarafından kullanılan veya alınan pirinç bitkileri, pirincin iç kısmıdır.

Yer kabuğunda bulunmasına rağmen Silika, tarımsal atıklar da dahil olmak üzere çeşitli kaynaklar ve sentez yöntemleri kullanılarak ticari üretimi yapılabilir. Ortaya çıkan silikon nanoparçacıkları, elektronik bileşenlerden ilaç salınımına kadar çeşitli endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır. Son yıllarda, silika nanoparçacıklarından oluşan ürünlerin pazar payının 2020'de yaklaşık 8,8 milyar ABD doları olduğu tahmin edilmektedir bu da gelecekte önemli pazar eğilimlerini göstermektedir.

Hindistan, Pakistan, Bangladeş, Sri Lanka, Avustralya, Tayland, Endonezya ve ABD, 1970-1985 yılları arasında devlet ve diğer kuruluşlar tarafından desteklenen pirinç kabuğu kullanımında öncülerdi. Yüksek silika içerikleri (ağırlıkça %87-97 SiO₂), yüksek gözeneklilik, hafiflik ve yüksek dış yüzey alanı gibi özellikleri diğer tarımsal kalıntılarla karşılaştırıldığında pirinç kabuğunun benzersiz özellikleri onu endüstriyel uygulamalar için değerli bir malzeme haline getirmektedir.

Seçilen ana mahsul kalıntılarının kimyasal bileşimi Tablo 9.1.'de verilmektedir. Mahsul kalıntılarının veya atıklarının kimyasal bileşenlerinin anlaşılması, bunların seçiciliklerini ve yakıt veya enerji üretimi için kullanımlarını artıracaktır.

Tablo 9.1. Bazı tarımsal atıkların kimyasal bileşimi

Doğal elyaf ismi	Selüloz	Hemiselüloz	Lignin	Kül
Pirinç samanı	34.4	24.3	19.2	15-20
Buğday samanı	35-45	20-30	8-15	10.1
Mısır koçanı	45	29.3-35	13.7-15	1-3
Rami	68-91	13.1-16.7	0.6-0.7	1
Keten	65	16	2.5	3.4
Hindistan cevizi	32.65	7.65	59.4	3.4
Abaka	56-63	20-25	7-9	3
Muz	70	6-8	12	1.2
Kenevir	70.2-74.4	18-22.4	3.7-5.7	-
Ananas	64.35	13.85	4.6	0.04
Kenaf	53-57	15-19	5.9-9.3	2-5
Pamuk	82.7	5.7	-	0.82-2
Sisal	67-78	7-11	10-24	0.6-1

Tarımsal atık veya tarımsal ürünlerden elde edilen katı atıklardan silika nanoparçacıklarının üretimi önemli bir çalışma alanıdır. Pirinç, mısır, arpa, buğday, şeker kamışı ve diğer tarımsal ürünler Dünya'da katı atık oluşturmaktadır; bu nedenle, kritik kaynakların üretilmesi için

alternatif bir kaynak olarak kullanımları ile kalan katı atık miktarı azaltılabilmektedir. Ayrıca pirinç kabuğu, buğday samanı, arpa otu ve diğer tarımsal atıklar, silika nanoparçacıkları üretimi için kaynak olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Son yıllarda, tarımsal atık ürünler silikon kompozitlerin hazırlanması için potansiyel bir hammadde olarak tanınmaya başlamıştır. Tarımsal atık, silika üretiminin en ucuz kaynaklarından biridir. Doğal silikanın kullanımı güvenli ve uygun maliyetlidir.

Silika, mısır koçanı, kahve kabuğu, pirinç kabuğu, şeker kamışı küspesi ve buğday kabuğu atıklarından elde edilebilir. Örneğin, pirinç kabuğu, bol miktarda silikon kaynağıdır ve toplamda yaklaşık %75-90 selüloz, hemiselüloz ve lignin ve %17-20 kül içeriği içerir. Kül, %90'dan fazla silika ve az miktarda metalik safsızlık içerir. Şeker kamışı endüstrisinin önemli bir yan ürünü olan şeker kamışı küspesi külü, %40-50 oranında silika içerir; asit ön işlemi, silika miktarını %80'e kadar artırmasına katkı sağlar. Tarımsal atık olarak, dünya çapında yıllık pirinç kabuğu üretimi 120 milyon tondur. Diğer biyokütle ile karşılaştırıldığında, pirinç kabuğu külünün ana içeriği silikon dioksittir (ağırlıkça %20). Pirinç kabuğundan silikon dioksit elde etme yöntemleri arasında sol-jel yöntemi, sodalı su yöntemi, çöktürme yöntemi ve ısı işlem yöntemi bulunur. Sol-jel yöntemi, düşük sıcaklıkta hidroliz ve polikondensasyonu içerir. Bu yöntemle hazırlanan SiO₂ partikülleri, iyi bir partikül boyutu dağılımına sahiptir. Ancak proses, endüstriyel üretim için uygun olmayan uzun bir üretim döngüsüne, yüksek kirliliğe ve yüksek maliyete sahiptir. Kül suyu yöntemi, pirinç kabuğu külünü alkali çözelti karıştırmaktır. Yaygın olarak kullanılan sodalı sular arasında NaOH çözeltisi ve K₂CO₃ çözeltisi kullanılır. Isıl işlem yöntemi genellikle çevre dostu, basit ve etkili olan daha az kimyasal reaktif tüketir. Pirinç kabuğundaki metal safsızlıkların bir ön işlem süreciyle ortadan kaldırılır ve ardından yüksek saflıkta silika kalsinasyon ile elde edilir.

Literatürde, silika üretimi için tarımsal atıkların kullanılmasına ilişkin çeşitli potansiyel yöntemler (Tablo 2) ve geçerli sebepler yer almaktadır.

Sebepler arasında tarımsal atıkların:

- Ucuz hammadde maliyeti,
- Tarımsal atıktaki yüksek oranda silika içeriği,
- Karşılaştırılabilir silika kalitesi,
- Şekilsiz malzemenin ince boyutu,
- Yüksek enerji içeriği,
- Düşük enerji tüketimi yer almaktadır.

Silikadaki elementlerden biri olan silikon (Si), kristal, polikristal veya amorf formda bulunmaktadır ve endüstride çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Genel olarak silika, tetrametil ortosilikat (TEOS) veya sodyum silikat gibi kimyasal kaynaklar kullanılarak üretilir; bununla birlikte silika doğal olarak kum, çakmaktaşı veya kuvarsta çeşitli şekillerde bulunduğu için, genellikle oldukça karmaşık olan sentez sürecini tamamlamak için çok fazla enerji gerekmektedir. Üretim için yüksek enerji tüketimi ve sıcaklık gerekliliklerinin genellikle yüksek maliyet, sürdürülemez ve çevre dostu olmadığı da belirtilmelidir. Bu endişenin bir sonucu olarak, literatürde, yeşil kimya ilkelerini kullanarak daha basit, ucuz ve çevre dostu silika nanoparçacıkları üretmek için yeni süreçler geliştirmenin yolları üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir.

Tablo 9.2. Çeşitli işleme yöntemleri kullanılarak bazı tarımsal atık kaynaklarından nanoparçacıkların sentezi

Başlangıç malzemesi	Prosedür dizisi	Ürünler	Parçacık boyutu (nm)
Pirinç kabuğu	Piroliz, çözeltilme alma (leaching). Sol-jel, İndirgenme, çözeltilme alma (leaching)	Silikon	70-100
Pirinç kabuğu	Asidik ön işlem, yakma, çözeltilme alma (leaching), piroliz, sol-jel (maksimum sıcaklık 500°C, 700°C, 1000°C)	Silika	6
Pirinç kabuğu (iki farklı kaynaktan)	Çözeltilme alma kalsinasyon (maksimum sıcaklık 650°C)	Silika	181,2-294,7
Mısır koçanı	Çöktürme, (maksimum sıcaklık 750 °C)	Amorf silika	25
Pirinç kabuğu	Sol-jel, süper kritik karbon dioksit kurutma (maksimum sıcaklık 600°C)	Nano gözenekli silika	10-60
Pirinç kabuğu, kahve kabuğu, şeker kamışı küspesi	Biyotransformasyon, kalsinasyon, Çözeltilme alma (leaching) (maksimum sıcaklık 700 °C)	Silika	152-254

Mısır sapı	Seyreltik hidroklorik asitte ön işlem ve etilen glikolde sodyum silikatın muamelesi	Silika	26,9
Manyok peridermi	Piroliz, sol-jel, kalsinasyon. (Maksimum sıcaklık 600 °C)	Silika	62

Lazer destekli elektrokimyasal aşındırma, darbeli lazer biriktirme, elektron ışını buharlaştırma, yanma sentezi ve plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme gibi nano silisyumun hazırlanması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu sentez yöntemleri uygun maliyetli değildir. Kimyasal sentez yöntemi ile boyut ve şekil kontrolünün yanı sıra malzemenin saflığında da iyileştirme gibi avantajlara sahiptir.

Literatürlerde plazma sentezi, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, mikro emülsiyon, yanma sentezi ve hidrotermal teknik gibi silika malzemeleri hazırlamak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Endüstriyel yöntem ile silika üretiminde, sodyum karbonat tozu ve kuvars kumu yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek sodyum silikat oluşturmaktadır. Elde edilen sodyum silikat sülfürik asit ile reaksiyona girerek silikat çöktürülür. Bu yöntem ile 0,51 ton sülfürik asit ve 0,53 ton sodyum karbonat kullanılarak 1 ton silika hazırlanırken 0,23 ton karbondioksit (CO₂), 0,74 ton sodyum sülfat ve 20 ton atık su oluşması nedeniyle çevreye oldukça zararlıdır. Son yıllarda, dünyanın başlıca endişelerinden biri, özellikle CO₂ ile ilgili olarak “sera” etkisidir Geleneksel tekniğin ana dezavantajları, yüksek enerji tüketimi ve yüksek kirlilik seviyeleridir.

Prosesler, büyük ölçekli ticari uygulamalarını sınırlayan ve sürdürülebilir kalkınma ilkesini ihlal eden büyük miktarlarda CO₂ ve inorganik tuzlar üretmektedir. Arzu edilen malzemelerle silika tozu üretmek için daha ucuz ve çevreye zarar vermeyen bir yöntemin daha fazla dikkat çektiğine inanılmaktadır. Bu nedenle, günümüzde çalışmaların çoğu, biyokütlelerin silika açısından zengin bir kaynak olarak kullanılmasına odaklanmıştır. Pirinç kabuğu külünde ağırlıkça %65 silika içeriği enerji üretmek için pirinç kabuğunun yakılması sırasında elde edilmektedir. Bu atık malzemeyi silika jellerinin ve tozlarının üretimi için ekonomik olarak uygun bir ham madde haline getirmektedir. Pirinç kabuğu külünün yanma işlemine ve bağıl nem bileşimine bağlı olarak, yüksek karbon kömürü, düşük karbon gri kül, karbonsuz pembe ve beyaz kül gibi farklı renklere sahip olabilmektedir. Farklı ajanlarla (asitler, bazlar vb.) ön ve son saflaştırma, farklı işlem sıcaklıkları kullanılarak, farklı yapılar ve saflıklar elde edilebilmektedir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.

Lityum iyon piller uzun ömürlü ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle kullanımı giderek artmaktadır. Önümüzdeki birkaç yıl içerisinde otomotiv sektörünün tamamen elektrikli araçlar üretmeyi hedeflemesi nedeniyle lityum iyon pillerin kullanımının önemli ölçüde artması nedeniyle günümüzde 420 GWh olan küresel lityum pil kapasitesinin ve 2030 yılında 2035 GWh'e ulaşması ve bu kapasitenin %85'inin elektrikli otomobillerde kullanılması beklenmektedir. Lityum iyon pillerin teknolojisi sürekli yenilenmekte ve güç yoğunluğu ve kararlılığı iyileştirilmektedir. Lityum iyon pillerin yapısında üretim teknolojisine bağlı olarak ağırlıkça %11 lityum, 9-89% kobalt, ve 30-75% nikel ve 8-28% mangan bulunmaktadır (British Geological Survey; 2018.) Lityum doğada düşük derişimlerde bulunmaktadır. Lityum ağırlıklı olarak tuz gölü kaynaklarından üretilmektedir. Günümüzde başlıca üretici ülkeler Bolivya Şili (8 milyon ton), Avustralya (2 milyon ton), Arjantin (2 milyon ton) ve Çin (1 milyon ton) lityum karbonat üretmekte ve üretilen lityumun neredeyse tamamı lityum iyon pillerin üretiminde kullanılmaktadır. Lityum doğada oldukça düşük derişimlerde bulunmaktadır. Lityum farklı mineraller ve tuz göllerinden oldukça karmaşık yöntemlerle elde edilmekte olup mevcut üretim tekniklerinin çevreye olumsuz etkileri tartışılmaktadır. Dünya lityum kaynakları oldukça sınırlı olması ve mevcut rezervin otomotivde gerçekleşecek dönüşümün başarısının geri dönüşüm teknolojilerine bağlı olduğunu göstermektedir. Bilinen global lityum rezervleri 17 milyon ton olup bu rezervin bugüne kadar sadece 68.000 tonu kullanılmıştır. Elektrikli otomotiv dönüşümü sonrasında 2050 yılına kadar 63,7 milyon ton lityumun kullanılması hedeflendiği dikkate alındığında 2050 yılında 46,7 milyon ton lityum açığı yaşanacağı açıkça görülmektedir (H. Bae and Y. Kim *Mater. Adv.*, 2021, 2, 3234–3250). Lityum iyon pillerin kullanım ömrü konusunda çelişkili rakamlar bulunmakla birlikte otomotiv sektöründe yaklaşık olarak 10 yıllık bir kullanım ömrü hedeflenmektedir. Dolayısı ile otomotivde kullanılan lityum iyon pillerin kullanım ömrü dolduktan sonra geri kazanımı oldukça kritik bir konudur. Günümüzde lityum iyon pillerin geri dönüşümü ve lityum pillerde kullanılan lityum, kobalt ve nikelin geri dönüşümü üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Lityum pillerin geri dönüşümünde pillerin mekanik olarak parçalanmasını izleyen hidrotermal, pyrometalurji ve elektrokimyasal ayırma yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak ayırma işlemi sırasında diğer önemli metaller nikel ve kobaltın da geri kazanımı gerçekleştirilmelidir. Bu yöntemlerin bir bölümü ticarileşmiş bir bölümü ise pilot ölçekte uygulanmıştır. Ancak kullanılan bu yöntemlerin teknik ve ekonomik analizleri, çevre etkileri, verimlilikleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan killerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

Bor işletmelerinden çıkan atıklardan lityum geri kazanımı çözme, ekstraksiyon, evaporasyon, kristalizasyon ve çöktürme gibi mevcut teknolojilerin uygulanması ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu mevcut teknolojilerin lityum geri kazanımı özelinde uygulanma olanaklarının araştırılması ve geliştirilmesi önem kazanmaktadır.

Bor işletmelerinde üretim kapasitelerine bağlı olarak oldukça fazla katı ve sıvı atıkların oluştuğu ve düzenli depolama yoluna gidildiği bilinmektedir. Bu atıkların içinde ise bor ile birlikte lityum gibi katma değeri yüksek endüstriyel hammaddeler bulunmaktadır. Bor işletmelerinden çıkan katı ve sıvı atıklardan lityum geri kazanımı için çözme, ekstraksiyon, evaporasyon, kristalizasyon ve çöktürme gibi mevcut teknolojilerin uygulanması ve bu teknolojilerin geliştirilecek proses içinde optimizasyon çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Geliştirilecek teknoloji veya prosesin ekonomik olarak uygulanabilir olması ve mümkün olduğunca yerli kaynakların kullanılması hedef olmalıdır.

Sıvı atıklarda bulunan lityum konsantrasyonunun oldukça düşük olması nedeniyle uygulanmakta olan prosesler kendi içinde oldukça enerji yoğun proseslerdir. Sıvı atıklarda bulunan lityumun konsantre hale getirilmesi en önemli problemlerdendir. Bununla birlikte katı atıklarda sıvı atıklara nispeten daha fazla lityum olsa da çözme/ liç (leaching) işlemleri nedeniyle mevcut sıvı atıklara ilave atık su çıkacağından uygulanabilir ekstraktif çözme işlemleri üzerine araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılması gereklidir.

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Fosforlu bileşiklerin sağladığı fosfor, özellikle tarımda bitkilerin sağlıklı büyümesi için gerekli besinlerden biridir. Fosfat kayaçları, tarımda fosfor için stratejik kaynaklardır ve yakın gelecekte arzı çok sınırlı hale gelecektir. Bir hammadde olarak fosforun bulunabilirliği, fosfat kayaçlarının aşırı tüketimi ile son yıllarda azalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca, konvansiyonel fosforlu gübrelerin aşırı uygulanması ötrofikasyonun birincil itici gücüdür. Tarımda tasarlanmış nanomalzemelerin kullanılması, mineral gübrelerin aşırı kullanımının olumsuz çevresel etkilerini azaltmanın yanı sıra besinlerin hassas bir şekilde verilmesini sağlar. Tarımsal verimliliğin sürdürülebilmesi için fosfor alım etkinliğinin artırılmasına yönelik çalışmalara öncelik verilmektedir. Hidroksiapatit nanopartiküller, yeni bir fosforlu gübre grubu olarak yenilikçi bir yaklaşım olabilir ve tarımsal verimi artırmak ve ötrofikasyonu azaltmak için umut verici bir potansiyel sunar.

Artan nüfus ve biyo-enerji mahsullerine yönelik artan talep, fosfatlı bileşiklerin kullanımının ana itici güçleridir. Ancak mineral bileşiklerde ki fosfor etkinliği %5-30 aralığında kalmaktadır. Bu

nispeten düşük fosfor (P) etkinliğinin üstesinden gelmek için, geleneksel mineral ürünler yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulanan miktarın çoğu, reaksiyona girmemiş materyal olarak atık şeklinde ortaya çıkmaktadır. Yüzey sularındaki bu sorunun üstesinden gelmek için, en iyi yönetim uygulamaları (BMP'ler) ve iyileştirme yöntemleri geliştirilerek kullanılabilir fosforun artırılması amaçlanmaktadır. P bileşiklerinin kullanımı ve atıklardaki P miktarının azaltılması fosforun etkin kullanım için geliştirilmelidir. Ayrıca, endüstriyel uygulamalardan fosforun geri kazanımı, uygulanan toplam miktarın yaklaşık %10 -30'u kadardır, geri kalanı çökelir ve çözünür katyonlar tarafından sabitlenir. Ancak fosforun kullanımını artırmak ve atık miktarını azaltmak için fosfor içeren nanobileşiklerin kullanımı alternatif ve umut verici bir çözüm olarak sunulmuştur. Fosfor, endüstride en çok kullanılan elementlerden biridir ve fosfor kullanımı, monoamonyum fosfat (MAP), diamonyum fosfat (DAP) veya üçlü süperfosfat (TSP) gibi fosforik asitten türetilen fosfat tuzları yoluyla elde edilebilir. Bu nedenle, fosforik asit, fosfat bazlı bileşiklerin üretiminde ana hammadDEDİR. Fosforik asit, esas olarak termal ve ıslak proses yöntemleriyle üretilir. Termal işlem, yüksek saflıkta fosforik asit sağlar ve esas olarak gıda ve farmasötik uygulamalarda tüketilir. Yaş proses temel olarak fosfat kayacının 70–80 °C'de sülfürik asit (H₂SO₄) ile çözünmesidir. Yüksek saflıkta fosforik asit üretilebilmesine rağmen endüstriyel ölçekli üretimlerde yüksek enerji maliyeti ve korozyon sorunları nedeniyle genellikle termal proses fosforik asit tercih edilmemektedir. Dünyada üretilen fosforik asidin %85'i fosfatlı gübre üretimi ve gübre sanayi için tüketilmektedir. Fosforik asit üretimi için genellikle yaş proses yöntemini kullanır. Sürekli fosfat kayası tüketimi, sınırlı fosfat kayası kaynakları olduğundan ve bu rezervlerin çoğu sürdürülemez bir şekilde tüketildiğinden, artan bir endişe olmaya devam etmektedir. Ayrıca, küresel ölçekte tarım arazilerinin çoğu fosfordan yoksundur, bu nedenle fosfor bitkiler için en zor erişilebilir temel besindir.

Bu zorluklar nedeniyle, gübre üretimindeki fosfor kaynakları için, bitkilere fosfor sağlamak için sürdürülebilir ve daha verimli yaklaşımlara acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, büyük partikül boyutları nedeniyle, toprakta fosfat hareketliliği, uygulanması üzerine çok sınırlıdır. Bitkilerin kök bölgesindeki fosfat konsantrasyonlarını azaltan geleneksel fosfatlı gübreler, Nano-hidroksiapatit, konvansiyonel fosfatlı gübrelerin kullanımıyla ilgili sorunların üstesinden gelirken kontaminasyon risklerini azaltırken verimli P (fosfor) besin alımı sağlayacaktır.

B. Dünyada ve Türkiye'de Teknolojik Hazırlık Seviyeleri

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada (1.1)	Türkiye’de (1.1)
THS 1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Nano silika verimi, karbonizasyon sıcaklığı, reaktöre besleme karışımının sıcaklığı, kül üretimi ve silisin dönüşümü gibi parametrelerle optimize edilebilir. Şu an ticarileşmiş bir ürün olmadığı görülmektedir. THS 1-3 olarak değerlendirilebilir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Atık lityum iyon pillerden lityum, kobalt ve nikelin geri kazanımı konusunda yurtdışında önemli çalışmalar yürütülmektedir. Avrupa Birliği 2025 yılına kadar mevcut lityum iyon pillerin % 65'inin geri dönüşümünün yapılmasını hedeflemektedir. Mevcut pil üreticileri bu konuda harekete geçmiş ve ortak projeler yürütülmektedir. Lityum iyon pillerin geri kazanımı konusunda faaliyet gösteren firmalar bulunmakla birlikte kullanılan teknoloji ve geri kazanım verimi hakkında detaylı bilgi bulunmamaktadır. Ancak yapılan araştırmada bu konudaki mevcut THS'nin 6-9 arasında olduğu öngörülebilmektedir. Ülkemizde bu konuda yapılan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan killerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye'de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü özellikle Kırka Bor İşletme Müdürlüğünde olmak üzere sıvı bor atıklarından bor ile birlikte lityum (lityum karbonat) geri kazanımı üzerine laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarını tamamladığı ve endüstriyel ölçekli bir lityum geri kazanım tesisi kurulumu için çalışmaların devam ettiği bilinmektedir. Katı bor atıklarını oluşturan killerden lityum geri kazanımı için ise Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü ve Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nün laboratuvar ölçekte çalışmalar yürüttükleri bilinmektedir. Buna göre borlu atık sulardan lityum geri kazanımı için THS seviyesi 6-8 ve borlu katı atıklardan lityum geri kazanımı için ise THS seviyesi 1-2 olarak kabul edilebilir.

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Tarım endüstrisi gelişmiş ülkelerde fosfat bileşiklerinin kullanılabilir hammaddeye dönüşümü açısından özellikle nano boyuttaki fosfat bileşikleri üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Teknolojik Hazırlık Seviyeleri	Dünyada	Türkiye’de
THS 1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
THS 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
THS 9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

C. Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Duruma İlişkin Başarılı Örnekler

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması.

Dünyada THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: Cyprus International University (Lefkoşa, KKTC), International Clean Water Institute (Manassas, USA), Universitatea Transilvania din Brasov (Brasov, Romania), Academy of Science of Moldova (Chisinau, Moldova), Brawijaya University (Indonesia), University of the Witwatersrand (Johannesburg, South Africa), Bindura University of Science Education (Bindura, Zimbabwe), Scientific and Industrial Research and Development Centre (Harare, Zimbabwe)

Türkiye’de THS 1-4: Temel ve Uygulamalı Ar-Ge çalışmaları: Ege Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)

Ulusal Tarımsal Araştırma Merkezi ve Japonya'dan Takata Engineering Corp., pirinç kabuğu külünden gübrede kullanılmak üzere yüksek oranda çözünür silisik asit üretim teknolojisi geliştirmişlerdir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Lityum iyon pillerin geri kazanımı konusunda faaliyet gösteren firmalar bulunmakla birlikte kullanılan teknoloji ve geri kazanım verimi hakkında detaylı bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle THS1-2 olarak öngörülebilir.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan killerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

American Potash Corp. endüstriyel ölçekte borlu atık sulardan lityum geri kazanımı gerçekleştirmektedir. THS seviyesi 8-9

Eti Maden Kırka Bor İşletme Müdürlüğünde 10 ton/yıl kapasiteli pilot ölçekte atık bor üretim proses sularından lityum karbonat geri kazanımı gerçekleştirmektedir. THS seviyesi 6-8

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Karboksi-metil selüloz (CMC) ile stabilize edilmiş nHA (nano boyutta hidroksiapatit) partiküllerini tek aşamalı ıslak kimyasal yöntemle hazırlanmış ve sentetik nHA kullanımının soya fasulyesi (Glycine max) üzerindeki etkilerini gözlemlemek için sera çalışması geliştirilmiştir. Sonuçlar, geleneksel P gübresine kıyasla büyüme oranında %32,6 ve tohum veriminde %20,4 artış göstermiştir. Ayrıca yer üstü ve yer altı biyokütle üretimi sırasıyla %18,2 ve %41,2 artmıştır. Sol-jel sentezlenmiş hidroksiapatit nanoçubukların nohut (Cicer arietinum) bitkisinin tohum çimlenmesi ve büyümesi üzerindeki etkinliği değerlendirmiştir. Kontrole kıyasla fosfor içerikli gübreler hem çimlenme oranında hem de bitki büyümesinde artış sağlamıştır. Fosfor, biyokütle, kadmiyum alımı, klorofil içeriği, C vitamini, MDA ve kadmiyumla kirlenmiş toprakta antioksidan enzimlerin aktivitesi açısından önemlidir. Topraktaki kadmiyum miktarı 10 mg kg⁻¹ olup, 5, 10, 20 ve 30 nHA kg⁻¹ uygulamaları bitki biyokütlesini sırasıyla % 7,97,

% 13,21, % 19,53 ve % 20,23 artırmıştır. Ayrıca kök kısımlardaki kadmiyum içeriği %27.12, %44.2, %50.91 ve %62.36 oranında azalmıştır.

Ayrıca doğal ham fosforitten türetilen nanoyapılı bir su-fosforit süspansiyonu ile bir sera çalışması yürütülmüştür. Meyve veriminde %14,5'ten %24,1'e bir artış kaydedilmiştir. Bitkilerin morfolojik indeksleri, taze verim ve mahsul üretim kalitesi de sırasıyla %8,3'ten 3,5 katına, %2,4'ten 2,2 katına ve %0,3'ten 2,6 katına yükselmiştir. Doymuş toprak kolonu deneylerinde nano ve yığın boyutlu HA'nın taşınmasını değerlendirilmiş ve model buğday bitkisi ile andisoller ve oksisollerde TSP ile karşılaştırmalı olarak fosforlu gübre olarak nHA ve yığın boyutlu HA'nın mevcudiyetini incelenmiştir. Toprak kolonu deneyleri, yığın boyutlu HA'da hareket göstermedi ve sırasıyla andisol ve oksisolde nHA'nın %5 ve <%1 yıkandığını gösterilmiştir. Buğdayın fosfor (P) alımı Triple Süper Fosfat gübresi kullanıldığında en iyi performansı göstermiş, bunu nano hidroksiapatit ve yığın boyutlu hidroksiapatit izlemiştir.

D. Ar-Ge ve Yenilik Sürecinde Biraraya Gelmesi Gereken Disiplinler ve Sektörler

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Ziraat Mühendisliği, Çevre Mühendisliği, Biyoteknoloji, Biyomühendislik, Kimya, Fizik, Kimya Mühendisliği, Polimer Mühendisliği, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği disiplinlerinden araştırmacılar biraraya gelmelidir.

Üniversite-Sanayi işbirliği kapsamında üniversitede gerçekleştirilecek yüksek lisans-doktora veya AR-GE çalışmaları ile laboratuvar ölçekli çalışmaların gerçekleştirilmesi, sanayi iş birliği ile pilot ölçekli çalışmaların yaygınlaşması, hem sanayi kuruluşlarından hem de ulusal kamu ve/veya uluslararası araştırma fonlarından alınacak destek ile pilot çalışmaların artırılması ve uzun vadede gerçek ölçekli çalışmalara geçilmesi önerilmektedir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Lityum iyon pillerin geri kazanım teknolojilerinin geliştirilmesi ve hayata geçirilmesi konusunda üniversiteler ve araştırma kurumlarında Kimya ve Malzeme Mühendisliği alanlarında akademisyenlerin ve araştırmacıların atık geri kazanım konusunda faaliyet gösteren sanayi kuruluşları ile işbirliği geliştirmeleri gerekmektedir. Mevcut atık geri kazanım firmaları bu konuda teşvik edilmelidir.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan killerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

Kimya (inorganik kimya, fizikokimya, yüzey kimyası, analitik kimya vb. konularda uzman)

Kimya mühendisi (reaksiyon kinetiği, ekstraktör tasarımı, malzeme seçimi, ısı transferi, kütle transferi vb. konularda uzman)

Malzeme mühendisliği (eH, pH, sıvı-sıvı faz diyagramları, yüzey kimyası vb. konularda uzman)

Makine mühendisliği (tesis tasarımı, reaktör-ekstraktör tasarımı vb. konularda uzman)

Madencilik (cevher zenginleştirme) ve kimya (kimyasal üretimi) sektörlerinde faaliyet gösteren AR-GE merkezleri ile üniversiteler Eti Maden, BOREN, MTA, İTÜ, Üniversiteler ve ilgili AR-GE merkezleri.

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Kimyager (inorganik kimya, fizikokimya, yüzey kimyası, analitik kimya vb. konularda uzman), Kimya ve Ziraat Mühendisleri bir araya gelerek ortak çalışmalıdırlar. Üniversitelerimizin kimya, kimya mühendisliği ve ziraat mühendisliği bölümleri ile fosfatlı gübre üreten firmaların (Toros Gübre, Gübretaş vd.) ve T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı'nın ve ilgili araştırma kurumlarının ortak Ar-Ge projeleri yürütmesi gerekmektedir.

E. Ar-Ge, Yenilik, Demonstrasyon İşbirliği Modeli ve Destek Mekanizması

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarı iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Türkiye'de bu konularla ilgili araştırmalar için bir envanter çalışması başlatılması gerekmektedir. Söz konusu konular ile ilgili öncelikli olarak ulusal durumun değerlendirilmesi için bir ulusal envanter raporu hazırlanmalıdır. Bu doğrultuda eksik yanlar, desteklenmesi gereken alanlar ve bütçeler belirlenmelidir ve bu alanlardaki çalışmalar ihtiyaçlar doğrultusunda desteklenmelidir. Benzer konularda yapılan çalışmalar oluşturulacak bir platform kapsamında gerçekleştirilerek sinerjik işbirliği sağlanmalıdır. Bu platformların sonuçları ilgili endüstri kolunda tanıtılmalı ve sanayi işbirliği yapılarak THS seviyeleri arttırılarak ürün

geliştirme ve prototip çalışmalarına geçilmelidir. Küçük bireysel çalışmalara nazaran bu çalışmaların bir platformda beraber çalışılmasının daha verimli olacağı düşünülmektedir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Sanayi, üniversite ve araştırma kurumları işbirliği yapmalı ve bu işbirliğini katalize edecek küçük ve orta ölçekli yenilik projeleri desteklenmelidir. Bu konuda sanayiinin katkısı ve doğrudan projeye katkı sağlaması ve proje çıktısı olarak en az pilot ölçekte demonstrasyon hedefi bulunmalıdır. Sonrasında yatırım desteği verilmesi süreci hızlandırabilir. Ayrı yürüyen münferit projelerin süreci yavaşlatması beklenmelidir.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan kilerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

Uzmanlık alanlarına göre AR-GE merkezleri, kamu araştırma enstitüleri, TENMAK ve BOREN gibi kurumlar ve Üniversiteler problem tanımına göre Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü bir araya gelerek çalışabilir.

TÜBİTAK TARAL 1001, 1007 ve 1003 destekleri ile proje ortaklıkları kurulabilir.

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Gübre fabrikalarının Ar-Ge Merkezleri, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı araştırma kuruluşları ve özel sektör tarım şirketlerinin eşgüdümlü bir platformda bir araya gelerek kamu tarafından desteklenecek projeler üzerinde çalışmaları uygun olacaktır.

F. Zaman ve Bütçe Tahminleri

(Kısa Vade: 1-3 yıl, Orta Vade: 3-5 yıl, Uzun Vade: 5 yıldan fazla)

9.1.a. Güneş pillerinde ve yarın iletkenlerin kullanıldığı sektörlerde kullanılmak üzere silisyum dioksitten ve atık biyokütleden (pirinç kabuğu, mısır koçanı vb.) yüksek saflıkta silisyum (silikon) ve silika üretim proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

9.1.a maddesi için öncelikle zaman ve bütçelere karar verilebilmesi için Türkiye'deki mevcut durumun tanımlanması ve seviyelerin belirlenmesi gerekmektedir. Türkiye'de bu alanda kullanımı uygun görülen tarım ürünlerinin yıllık üretim ve hasat miktarları belirlenmeli ve ölçekli üretim için planlama çalışmaları yapılmalıdır.

Uygun biyokütlenin bulunması ve sentez çalışmaları 1-3 yıl, pilot ölçekli çalışmalar için 3-5 yıl. Gerçek ölçekli çalışmalara ulaşılabilmesi için ilk olarak laboratuvar ölçekli ve pilot ölçekli kritik ürün/teknoloji çalışmaları üzerine yoğunlaşılması gerekmektedir. Kritik ürün/teknoloji ön çalışmaları kısa vadede, büyük ölçekli çalışmalar uzun vadede hedeflenmelidir.

9.1.b. Atık güneş panellerinden, lityum iyon pillerden, elektronik çiplerden saf kimyasalların (silisyum, lityum, gümüş, bakır, kalay vb.) geri kazanım proseslerinin geliştirilmesi ve uygulanması

Lityum iyon pillerin geri kazanımı konusunda oldukça fazla araştırma sonucu bulunmaktadır. Bu nedenle kısa ve orta vadede uygulamaya geçiş hedeflenebilir. Bu konuda en az pilot ölçekte geri kazanımı sağlayacak büyüklükte tesis için yeterli bütçe ayrılmalıdır.

9.1.c. Bor üretimi sırasında çıkan kilerden ve sıvı atıklardan elektrik bataryalarında ve hidrojen depolama sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek saflıkta lityum bileşiklerinin (lityum karbonat, lityum hidroksit) eldesine yönelik proseslerin geliştirilmesi ve uygulanması

Bor İşletmeleri bir kamu kurumu olan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü sorumluluğunda olduğundan AR-GE desteği olarak TÜBİTAK programları, TENMAK ve doğrudan kurumun desteklediği projeler şeklinde olabilecektir. Bu nedenle proje kapsamı, süresi ve mevcut THS seviyesine göre bütçe ve süre değişebilir.

1. Sıvı atıklardan lityum geri kazanımı proses iyileştirme Ar-Ge süresi: 2 yıl, (kısa)
Ar-Ge bütçesi: demonstrasyon ve yatırım, 75 milyon TL
2. Katı atıklardan lityum geri kazanımı proses geliştirme Ar-Ge süresi: 3 yıl, (orta)
Ar-Ge bütçesi: AR-GE ve demonstrasyon, 50 milyon TL
3. Lityum karbonattan lityum hidroksit üretimi Ar-Ge süresi: 2 yıl, (kısa)
Ar-Ge bütçesi: AR-GE ve demonstrasyon, 25 milyon TL

9.1.d. Atık sulardan ve atıklardan fosfat gibi fosforlu bileşiklerinin geri kazanımı, kullanılabilir hammaddeye dönüşüm teknolojileri

Ar-Ge çalışmaları için 3-5 yıllık orta vade yeterli görülmektedir. Geliştirilecek proses ve ürünlerin ülke genelinde uygulanması için 5 yıldan fazla süreli uzun vade öngörülmektedir

G. Teknolojik İlerlemenin Sağlanmasında Kritik Hususlar

Kamunun adım atması gereken hususlar	<p>Teknolojik ilerlemenin sağlanması için öncelikle ihtiyaç duyulan altyapının tespiti, temini ve Ar-Ge için fon sağlanması en önemli husustur. Kimyasal, makine ve teçhizat temini oldukça uzun süreler almakta maliyetleri ise gümrük vergisi, ara komisyonlar nedeni ile yurt dışına göre oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle Ar-Ge amacı ile kullanılacak sarf malzemesi ve makine teçhizat için doğrudan alım ve vergi muafiyetleri Türkiye'deki Ar-Ge çalışmalarını rekabet gücünü artıracak önemli hususlar olarak öne çıkmaktadır.</p>
Mevzuat ve yasal düzenlemeler	<ul style="list-style-type: none">• Standartların erişime açık hale getirilmesi,• Fikri mülkiyet hakları konusunda yapılabilecek düzenlemeler,• Patent desteklerinin artırılması,• Patent başvuru ve kabul aşamalarındaki prosedürlerin kısaltılması• Teknoloji transfer yönetmeliklerinin incelenmesi ve süreçlerde hız kazanılması
Teknik Altyapılar	<p>Silikon ve silika üretimine yönelik altyapıların geliştirilmesi gerekmektedir. Elde edilen malzemelerin laboratuvar ölçekte sentezine yönelik üretim alt yapıları, karakterizasyonu üniversiteler ve Ar- Ge merkezlerinde bulunmaktadır.</p> <p>Ticarileşme yolunda sertifikasyon merkezleri oluşturulmalıdır.</p> <p>Ülkemizde bulunan, UME ve TÜRKAK gibi kuruluşlardan sertifikasyon hizmeti alınabilmektedir. İhtiyaç halinde uluslararası geçerliliği olan sertifikasyonlar temin edilmelidir.</p>
İnsan Kaynakları (İlgili yetkinlikte)	<p>Ülkemizdeki üniversite altyapıları ve lisans seviyesindeki bölümlerde, Araştırma Merkezlerinde ve sanayide konu ile ilgili insan kaynağı açısından bir kısıt bulunmamaktadır. Bunların</p>

kalifiye eleman, ara teknik eleman, vb.)	<p>yanında, uzmanlık kazanılması ve yetkinliklerinin artırılması amacıyla ilgili konularda çağrılara çıkılabilir, motivasyon ve teşvik amaçlı başarı bursları sağlanabilir ve/ veya sanayi iş birlikleri ile çalışma hayatına kazandırılarak doktoralı, yüksek lisans sahibi yetkin araştırmacıların istihdamı sağlanabilir. Bu gibi önemli çalışmalar ile alandaki yetkin insan kaynağı sayısı artırılabilir ve ticari ürüne geçiş hızlanabilir.</p> <p>Ekonomik ve akademik doğru kurgulanması ve uygulanması durumunda yeterli insan kaynağı mevcuttur.</p>
Teşvik ve Destekler	<p>Tarımsal destek fonları hazırlanmalıdır ve özellikle bu alan için kullanımı uygun görülecek tarımsal ürünlerin üretimi için teşvik verilmelidir.</p> <p>Hedeflenen ilerlemenin sağlanması için büyük bütçeli altyapı yatırımına ve beraberinde Ar-ge desteğine imkân tanıyacak teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır.</p> <p>Çeşitli teşvik programları ile (TEYDEB, hibe, uzun vadeli kredi vs) geliştirilecek ürünlerin ticarleştirilmesine katkı sunulabilir.</p> <p>Girişimcilik konuları desteklenebilir.</p> <p>Öncelikli konularda desteklenen projelerde destek amaçlı vergi indirimi yapılabilir.</p> <p>Proje çalışanlarındaki proje teşvik ikramiye oranları artırılabilir.</p> <p>Altyapı, bakım onarım ve teçhizat destekleri artırılmalıdır.</p>

EK 1. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Kimyasallar Danışma Grubu Üyeleri

No	Ad-Soyad	Kurum/Kuruluş
1	Doç. Dr. Alper SARIOĞLAN (Moderatör)	İstanbul Teknik Üniversitesi
2	Prof. Dr. Serdar Suut ÇELEBİ	Hacettepe Üniversitesi (Emekli)
3	Prof. Dr.Esra YEL	Konya Teknik Üniversitesi
4	Prof. Dr. Atif KOCA	Marmara Üniversitesi
5	Prof.Dr. Hasan Can OKUTAN	İstanbul Teknik Üniversitesi
6	Prof. Dr.Gürkan KARAKAŞ	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
7	Prof.Dr. Tarık EREN	Yıldız Teknik Üniversitesi
8	Prof. Dr.Jale YANIK	Ege Üniversitesi
9	Prof. Dr. Bülent KESKİNLER	Gebze Teknik Üniversitesi
10	Prof.Dr. Filiz KARAOSMANOĞLU	İstanbul Teknik Üniversitesi
11	Prof. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ	Gebze Teknik Üniversitesi
12	Doç. Dr. Bağdagül KARAAĞAÇ	Kocaeli Üniversitesi
13	Prof. Dr. İlgı KARAPINAR	Dokuz Eylül Üniversitesi
14	Prof. Dr. Meltem DALAY	Ege Üniversitesi
15	Prof. Dr. Nuriye ALTINAY PERENDECİ	Akdeniz Üniversitesi
16	Prof. Dr.Şerife Birgül ERSOLMAZ	İstanbul Teknik Üniversitesi
17	Elif UNVEREN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
18	Tahsin BAHAR	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
19	Şerife SARIOĞLAN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
20	Tuğba LEKESİZ	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
21	Fehmi AKGÜN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
22	Erkan ERTÜRK	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)

23	Kerem BÜLBÜL	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
24	Hande ÇUKURLU	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
25	Tuğba ÖZTÜRK	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
26	Merve GÜRTEKİN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
27	Serhat ODABAŞ	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
28	Gülçin NALBANTOĞLU	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
29	Gözde ÖZDOĞAN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
30	Ayşe TURGUT	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
31	Halit BALOĞLU	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
32	Ufuk KAYHAN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
33	Özgür Can KORKMAZ	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
34	Ömer ORÇUN ER	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
35	Özlem ATAÇ	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
36	Berrin ENGİN	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
37	Mehmet DİLAVER	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)
38	Ceyda Zeynep KOYUNCU	TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)

EK 2. Yeşil Büyüme Teknoloji Yol Haritası Kimyasallar Sektörel Odak Grubu Üyeleri**Moderatör:** Derya ERÇIKAN - Türkiye Kimya Sanayicileri Derneği (TKSD)

No	Ad-Soyad	Kurum/Kuruluş
1	Ahmet MUSLUOĞLU	Hochreiter Biyogaz Aş.
2	Ahmet Ozan GEZERMAN	TOROS Tarım
3	Ali GİZLİ	Akzonobel Kemipol A.Ş.
4	Ayça KULAKSIZ	TOBB
5	Ayda ÜNLÜ	Polisan Kimya
6	Aydın YILMAZ	İstanbul Kimyevi Maddeler Ve Mamulleri İhracatçılar Birliği
7	Aysel ZAHİDOVA	SOCAR Türkiye
8	Başak TUNCER	SOCAR Türkiye
9	Bilge ÇETİN	Boya Sanayicileri Derneği (BOSAD)
10	Caner ZANBAK	Türkiye Madenciler Derneği (Tmd)
11	Derya ERÇIKAN	Ege Kimya Sanayi Ve Ticaret A.Ş.
12	Derya MARAŞLIOĞLU	ETİ MADEN
13	Doç.Dr. Belma SOYDAŞ SÖZER	TENMAK Naten
14	Doğu KAYA	Kauçuk Derneği
15	Dr. Ali ÖNEN	Organik Kimya San.Tic.A.S
16	Dr. Derya AYDIN	Ak-Kim Kimya San A.Ş.
17	Dr. Muhsin Selçuk DENİZLİGİL	Polisan Kimya
18	Dr. Uğur Erşen ŞENBİL	Ak-Kim Kimya San A.Ş.
19	Elif Burcu ÖZ	İstanbul Kimyevi Maddeler Ve Mamulleri İhracatçılar Birliği
20	Emrah Eren	Aksa Akrilik Kimya A.Ş.
21	Erdinç KAZAK	AKSA
22	Erol ÖZENSOY	KİMETSAN

23	Ersen ERTAŞ	TÜPRAŞ
24	Esin AKDENİZ	Organik Kimya San.Tic.A.S
25	Esin ÖZARSLAN	TOBB
26	Fatma KAZAK	Kozmetik Ve Temizlik Ürünleri Sanayicileri Derneği (Ktsd)
27	Gökhan AYGÜN	Sunar Mısır Entegre Tesisleri Sanayii Ve Tic. A. Ş.
28	İpek HARMANLI	TÜPRAŞ
29	İsmail Hakkı HACIALİOĞLU	Kompozit Sanayicileri Derneği
30	Kerem PAKSOY	TUREB (Rüzgar Enerjisi Birliği)
31	Mehmet Emre ŞENER	Setaş Kimya Sanayii Aş Araştırma
32	Neşe ERİŞ	TOBB/T. Kimya Sanayi Meclisi
33	Osman Burak AKDİKMEN	Kompozit Sanayicileri Derneği
34	Ozan KAYA	Energrom Aş
35	Ö. Barış MİKYAS	Klor Alkali San. Ve Tic. A.Ş.
36	Özge TORCU	TOBB
37	Rıza ÜNVER	Aksa Akrilik Kimya A.Ş.
38	S. Berna YILDIZ	İstanbul Kimyevi Maddeler Ve Mamulleri İhracatçılar Birliği
39	Selcuk DENİZLİGİL	Polisan Kimya
40	Serdar ÇELEBİ	TÜPRAŞ
41	Sultan GARAYEV	SOCAR Türkiye
42	Vahide MUTLU	SOCAR Türkiye
43	Yasemin KAYHAN	Türkiye Kimya Sanayicileri Derneği (TKSD)
44	Yusuf Ali TAŞTI	Sasa
45	Zeynep Tülin YILMAZ	Özdekan Kauçuk A.Ş.

EK3: Çalışmanın Yürütülmesinde Görevli TÜBİTAK Yetkilileri

Ad Soyad	Kurum/Kuruluş
Hande ALPASLAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanı
Melis KOCATÜRK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Müdür V.
Dr.Özlem DOĞAN	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Başuzmanı-Kimyasallar TYH Koordinatörü
Mehmet İmran AKSU	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı
Büşra YILMAZ YANIK	TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Dairesi Bilimsel Programlar Uzmanı