

---

# KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Doç.Dr. Güzide PEKCAN

---

# KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

**Editör**

Doç. Dr. Güzide PEKCAN

**yaz**  
yayınları

2024

---

**© YAZ Yayınları**

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

---

E\_ISBN 978-625-6104-65-5

Ekim 2024 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

[www.yazyayinlari.com](http://www.yazyayinlari.com)

[yazyayinlari@gmail.com](mailto:yazyayinlari@gmail.com)

[info@yazyayinlari.com](mailto:info@yazyayinlari.com)

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Modern Katı Biyoyakıtlar .....</b>                                                                                                                       | <b>1</b>  |
| <i>Zehra YILDIZ</i>                                                                                                                                         |           |
| <b>Sera Gazı Metanın (CH<sub>4</sub>) Yönetimi: Emisyon<br/>Kaynakları ve Kömür Yatağı Metanının<br/>Saflaştırılmasına Yönelik Güncel Yaklaşımlar .....</b> | <b>18</b> |
| <i>Hazal ÖZTAN, Duygu UYSAL</i>                                                                                                                             |           |

*"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."*

# MODERN KATI BİYOYAKITLAR

**Zehra YILDIZ<sup>1</sup>**

## 1. GİRİŞ

Isıtma, aydınlanma, ulaşım ve elektrik amaçlı kullanılan enerjinin yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi önündeki en büyük sorun kurulum maliyeti ve kısıtlı depolanmasıdır. Enerjinin yaklaşık %80’ni depolama sorunu olmayan ve ucuz enerji kaynağı olan fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil yakıtların bileşimi ve konumundan dolayı sahip olduğu kimyasal enerji, yanma olayı sonunda ısı enerjisine daha sonra mekanik enerjiye ve elektrik enerjisine dönüşmektedir. Ancak fosil yakıtlardan yanma olayı ile enerji elde edilirken çevreye zarar veren baca gazı emisyonları ve kül gibi atıklar bırakılır. Bu sebeple temiz çevre için fosil yakıtlara alternatif yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmıştır. Geleceğin yenilenebilir enerji kaynaklarından biri biyokütle enerjisidir. Fosil yakıtlar, fosil biyokütle olup, depolanma sorunu olmayan, alt-üst yapının oturmuş olması, yıllardır yaygın kullanılan, 7 gün 24 saat enerji üretilebilir sürekli, elektrik, ısınma ve ulaşım gibi birçok alanda kullanılan çok fonksiyonlu bir enerji kaynağıdır. Ayrıca biyokütle, fosil yakıtlar gibi kimyasal hammadde kaynaklarıdır. Bu bakımdan fosil yakıtlara en uygun alternatif biyokütle enerjisidir. Fosil yakıtlar ve biyokütle aynı temel prensibe göre enerji üretilir. Biyokütle, fosil yakıtlara göre ısı değeri düşük ve daha nemli bir yakıt olmasına rağmen yerli, yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı ve kimyasal

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri, zyildiz@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1304-4857.

hammadde kaynağı olduğu için geleceğin yakıtıdır (Topkoç ve Yıldız, 2021).

Biyokütle, yaşayan ya da en fazla 100 yıl önce yaşamış organik madde kaynağı biyolojik materyallerdir. Biyokütle hayvansal ve bitkisel materyallerden oluşmakta olup, daha çok bitkisel kaynaklar biyoyakıtların eldesinde kullanılmaktadır. Yeşil yapraklı bitkiler, fotosentez yolu ile güneş enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek bünyelerinde depolar. Tarım, hayvancılık, orman ürünleri ve aquatik ürünler gibi biyokütleler ile bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, endüstriyel ve evsel atıklar gibi atık biyokütleler biyokütle enerji kaynaklarıdır. Biyokütleler düşük yoğunluklu ve yüksek nem içerikli olduklarından doğrudan yakılması çok etkin olmamakla beraber doğrudan kullanılması taşıma, depolama ve işleme aşamalarında ekonomik değildir. Bu sebeple uygun çevrim teknolojileri ile biyoyakıtlara dönüştürülmeleri daha uygundur (Atay vd., 2018). Biyoalkol, biyodizel, biyogaz, biyohidrojen, biyokömür, biyopelet ve biyobriket biyoyakıtlardır. Biyokütlelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak işlenmesi sonucu biyoyakıtlar elde edilmektedir. Biyopelet ve biyobriket gibi katı biyoyakıtlar basit fiziksel işlemlerin uygulanması sonucu elde edilir. Biyodizel, biyoetanol, biyokömür ve biyogaz kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucu elde edilir.

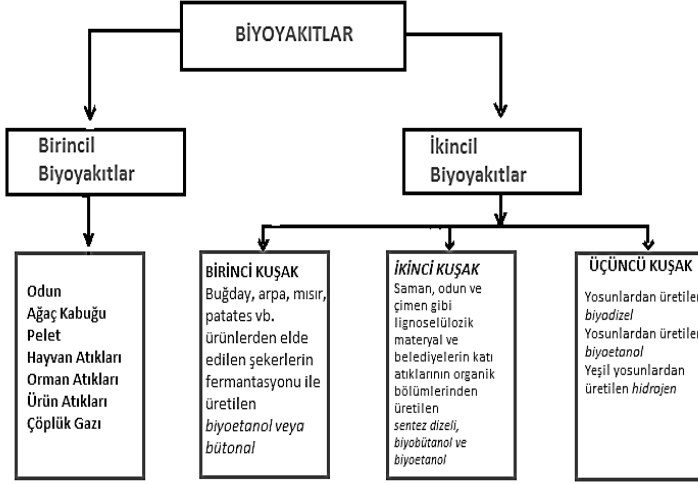
## **2. BİYOYAKIT SINIFLANDIRILMASI**

Biyoyakıtlar, yakıtın fiziksel haline, uygulanan işlemlere ve elde edildiği hammadde kaynağına göre sınıflandırılırlar. Şekil 1 de görüldüğü gibi biyoyakıtlar, biyokütlenin işlenip işlenmemesine göre birincil ve ikincil biyoyakıtlar olarak ikiye ayrılır. Birincil biyoyakıtlar işlenmemiş biyokütlelerden oluşan odun, talaş, hayvansal atıklar gibi enerji üretimi için kullanılan yakıtlardır. Birincil biyoyakıtlar, ısıtma veya elektrik ihtiyacının

karşılanmasında doğrudan kullanılır. Birincil biyoyakıtlar, odun, pelet, biyogaz, biyobriket, biyokömür gibi biyoyakıtlardır. İkincil biyoyakıtlar, biyokütlelerin işlenmesiyle elde edilen biyodizel, biyoetanol gibi yakıtlardır. İkincil biyoyakıtlar, birincil biyoyakıtların kullanıldığı her alanda kullanılabildiği gibi motor yakıtı olarak araçlarda da kullanılabilir. (Baydemir, 2023). İkincil biyoyakıtlar, birinci kuşak biyoyakıt, ikinci kuşak biyoyakıt ve üçüncü kuşak biyoyakıt olmak üzere üç türdür. Birinci kuşak biyoyakıtlar buğday, arpa, mısır ve patates gibi nişasta içeren bitkilerin fermantasyonu sonucunda elde edilen biyometanol, biyoetanol veya biyobütanoldan oluşur. Birinci kuşak biyoyakıtlar elde edilirken hayvan yemi veya gıda maddesi gibi birçok yan ürün oluşur. Genellikle tarımsal üretim sonucu elde edilen ve gıda maddesi olarak kullanılan bu enerji ürünleri tarıma rekabet oluşturur. İkinci kuşak olarak anılan biyoyakıtlar, temelde atık bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan ve mikroorganizmalardan üretilir. Bu yakıtlar, elde etmesi zor olan lignoselülozik biyokütle, odunsu ürünler, tarımsal kalıntılar veya atıklardan elde edilir. Bu biyokütle kaynakları gıda maddesi olarak kullanılmadığı için tarım ile rekabet etmemektedir ve bununla beraber hektar başına verimleri yüksektir. Yağlı tohum bitkilerinden elde edilen bitkisel yağlar ve hayvansal yağlardan elde edilen yağ asidi esteri olan biyodizel, biyoFT dizel, biyoDMF (dimetilfuran), biyoeter, biyogaz, sentez gazı ikinci kuşak biyoyakıtlardandır. Üçüncü kuşak biyoyakıtlar çoğunlukla algler ve siyano bakteriler gibi suda yetiştirilebilen hammaddelerden üretilen biyometan, biyohidrojen, alglerden elde edilen biyoetanol ve biyodizel gibi jet ve uaklarda da kullanılabilen yakıtlardır. Üçüncü kuşak biyoyakıtlar, gıda maddeleri ile rekabet etmeyen biyoyakıtlardır (Baydemir, 2023; Cısdık, 2008; Gullu ve Bayrac, 2017, Işık ve Yavuz, 2022). İkinci ve üçüncü kuşak biyoyakıtların üretim teknolojisi ve işletme maliyetleri fazla olmasından dolayı ekonomik ve rekabetçi bir

yakıt değildir. Ancak maliyetler düşer ve kullanımı yaygınlaşırsa ticarileşebilir (Gullu ve Bayrac, 2017).

**Şekil 1. Biyoyakıt Sınıflandırılması**



Biyoyakıtlar elde edilen yakıtın fiziksel haline göre ise katı, sıvı ve gaz biyoyakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır. Gaz biyoyakıtlar, biyohidrojen, biyogaz ve sentetik gazlardır. Sıvı biyoyakıtlar; biyometanol, biyoetanol, biyobütanol gibi biyoalkoller, biyodimetiler, biyoetilersiyerbutiler gibi biyoeterler ve biyodizel gibi biyoesterden oluşur. Katı biyoyakıtlar, biyokömür, biyopelet ve biyobriketlerdir (Gullu ve Bayrac, 2017). Katı biyoyakıtlar ise geleneksel ve modern katı biyoyakıtlar olarak iki kategoride sınıflandırılır. Geleneksel katı biyoyakıtlar, işlem uygulanmamış biyokütle ve atık biyokütlelerden oluşur. Modern katı biyoyakıtlar ise biyokütle veya atık biyokütlenin işlenmesi ile elde edilen biyoyakıtlardır. Modern katı biyoyakıtlar, biyokömür, biyopeletler ve biyobriketlerdir. ISO/TC (International Organization for Standardization/Technical Committee) göre yapılan biyoyakıtlar sınıflandırılmasında katı biyoyakıtlar ISO/TC 238 ve sıvı biyoyakıtlar ISO/TC 28/SC7’de tanımlanmıştır. Ülkemizde katı

biyoyakıtlar, yakıt özellikleri ve sınıfları TS EN ISO 17225-1 standartları dikkate alınarak değerlendirilmektedir (Sözen vd., 2017). Ayrıca katı biyoyakıtlar, biyokütleyle işlem uygulanıp uygulanmamasına göre geleneksel (birincil katı biyoyakıt) ve modern katı biyoyakıtlar (ikincil katı biyoyakıt) olarak da sınıflandırılır. İşlenmemiş biyokütle ve atık biyokütle geleneksel katı biyoyakıtlardır. Modern katı biyoyakıt ise biyokütlenin bazı işlemlerden geçerek elde edilir. Modern biyoyakıtlarda, hammadde öğütülerek parçacık boyutu düşürülür, böylece temas yüzeyi artar. Öğütülen biyokütle parçacıklarının kurutma işlemi ile nemi düşürülür ve daha sonra yüksek basınç uygulanarak sıkıştırılır. Sonuçta uniform, düşük yoğunluklu ve ısı verimi yüksek yakıt elde edilir. Biyokömür, biyopelet ve biyobriket, modern biyoyakıtlardır. Bu yakıtlar odun ve kömür gibi ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kazan yakıtı olarak kullanılabilir (Gürdil vd., 2015).

Türkiye’de yılda yaklaşık 194 milyon ton hayvansal atık, 62 milyon ton bitkisel atık ve yaklaşık 32 milyon ton belediye atığı elde edilmiştir. Bu atıklar yılda 34 milyon TEP enerjiye eşdeğerdir (Işık ve Yavuz, 2022). Özellikle tarım ülkesi olan Türkiye’de tarımsal artıkların, enerji kaynağı olarak katı yakıt olarak değerlendirilmesi ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacaktır. Türkiye’de enerji dönüşümünde yararlanılabilecek tarımsal kaynaklı atıklar 13 milyon ton/yıl olup, bu atıkların ısı değeri 228 PJ’dur (Dok vd., 2021). Biyoatıkların değerlendirilerek biyoısıya dönüştürülmesi enerji ekonomisine önemli bir katkı sunacaktır. Dünya’da yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen ısıнын %90’ı biyokütleden sağlanmaktadır. Sanayi ve binalarda tüketilen ısıнын %10’u biyoısıdır. Biyokütleden ısı üreten önemli ülkeler Asya ve Avrupa’da bulunmaktadır. Biyokütleden elektrik üretimi sırasıyla Amerika, Çin, Almanya, Brezilya, Japonya, İngiltere,

Hindistan'dır. Japonya ve Kore de kömür santrallerinde biyokütle ve kömür birlikte yakılmaktadır (Ar, 2018).

Toplam enerji talebinin yaklaşık %6,4'ü modern biyokütle enerjisinden karşılanmakla beraber bu miktar yenilenebilir enerjilerin yaklaşık yarısı kadardır. Dünya da 124 GW biyokütle elektrik üretim tesislerinin kurulu gücün %70'ini katı biyoyakıtlardan geri kalan kısmı sırasıyla biyogaz, diğer biyokütle enerji kaynakları ve sıvı biyoyakıtlardan sağlanmaktadır. Biyoyakıt enerji arzın %85'i katı biyokütleden %7'si sıvı yakıt, %5'i belediye ve endüstriyel atıklar, %3'ü biyogazdan sağlanmıştır. Türkiye de ise biyokütle enerjisinin toplam kurulu gücünün %54'ünü biyogaz, geri kalan kısmını sırasıyla katı biyoyakıt, kentsel atıklar ve sıvı biyoyakıt oluşturmaktadır (pcw.com.tr, 2021). Dolayısıyla modern katı biyoyakıtların gerek elektrik gerekse ısı üretiminde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

### **3. BİYOPELET**

Birçok gelişmiş ülkede katı biyokütle ve atıkları, peletleme işlemi ile biyokütlenin yoğunlaştırılmasını sağlayarak yakıt değeri ve yanma verimi yüksek ekonomik ürünlere dönüştürülmektedir (Akay vd., 2016). Biyopelet, atık biyokütle veya biyokütleye kurutma, öğütme ve pressleme gibi basit fiziksel işlemler uygulanarak üretilir (Baydemir, 2023). Pelet üretiminde ham madde olarak tarımsal artıklar, enerji bitkileri, ormancılık ve odun artıkları yalnız veya birlikte harman şeklinde kullanılmaktadır. Pelet yapımında biyokütle kaynağı olarak genellikle odun talaşı, odun yongaları, ağaç kabukları, sert kabuklu kuruyemişlerin kabukları, ekin sapları, mısır koçanı, pancar küspesi, sert kabuklu çekirdekler, zirai ürünler ve atık kâğıt gibi ürünler kullanılır. Biyokütle materyalleri öğütme, kurutma ve sıkıştırma gibi basit fiziksel işlemler sonucu

biyopeletler elde edilir. Biyokütle numuneleri nem içeriği %8-12 olana kadar kurutucularla kurutulur. Kurutma işlemi toplam pelet maliyetinin %70'ini oluşturan enerji yoğunluklu bir prosesdir. Pelet, bağlayıcı madde kullanılmadan üretilecekse peletleme işlemi yüksek basınç altında gerçekleştirilir. Kurutulmuş ve öğütülmüş biyokütle numuneleri silindir pressler ile sıkıştırılarak çapları 4 ila 12 mm, uzunluğu 10-30 mm arasında değişen silindirik formda yakıt çubuklarına dönüştürülerek peletler elde edilir (Küsek vd., 2015; Aydemir, 2017).

Biyokütlenin biyopelet haline geldiğinde ısı değeri yüksek ve yığın yoğunluğu düşük dolayısıyla taşıma, depolama ve nakliye masrafları daha az ucuz bir katı yakıt elde edilir (Küsek vd., 2015; Bilgin vd., 2016; Yılmaz vd., 2021). Biyokütlenin yoğunluğu yaklaşık  $150 \text{ kg/m}^3$  iken biyopeletin yaklaşık  $0.7-0.8 \text{ ton/m}^3$ 'dir.  $600 \text{ kcal/kg}$  harcanarak biyokütleden yaklaşık  $2000-4000 \text{ kcal/kg}$  değerinde enerji sağlayacak biyopelet elde edilir (Yıldız, 2023).

Homojen boyut ve şekilde olan yakıt yakma sistemlerine otomatik beslenir, daha verimli yanar ve çevreye daha az zararlı emisyon verir. Atık biyokütleden biyopelet elde edildiğinde, atıklar geri kazanılarak değerlendirilerek ekolojik ve ekonomik, yerli ve yenilenebilir bir yakıt elde edilir. Bu yakıtlar, ısı ve elektrik üretiminde fosil yakıtlar yerine kullanılabilecek alternatif bir kazan yakıtıdır (Küsek vd., 2015; Bilgin vd., 2016; Yılmaz vd., 2021).

Biyokütleden pelet üretimi, son on yılda %100 artmıştır. Pelet tüketiminin yarısı ev ısıtmasına ait olmasına rağmen, pelet tüketiminde en fazla artış elektrik üretimde gerçekleşmiştir. Dünya pelet gereksinimi, 2030 yılında 350-400 milyon tona yükseleceği öngörülmektedir (Aydemir, 2017). Avrupa'nın birçok ülkesinde son 20 yıldır pelet üretimi yapılmakla beraber Avrupa en büyük pelet pazarıdır. Avrupa'nın neredeyse

tamamının yakıt ihtiyacı odun peletinden karşılamaktadır. 2016 yılında ise Avrupa 16,6 milyon tonluk üretim hacmi ile peletlerin %74'ünü karşılamıştır. Avrupa'da pelet tüketiminin yaklaşık %61,8'lik büyük bir kısmı konut ve ticari ısıtma, %38,2'lik kısmı ise güç üretiminde kullanılmaktadır (Aydemir, 2017). Yakıt ihtiyacı için Avrupadan sonra en fazla odun peletinden yararlanan ülkeler sırasıyla Kuzey Amerika, Rusya ve İskandinavya ülkelerinin karşılamaktadır (Zengin vd., 2020; Yılmaz vd., 2021).

Ülkemizde ise biyopelet üretimi yapan çok az sayıda tesis bulunmakta olup, yaklaşık 30 resmi üretim tesisi vardır. Bu tesislerin çoğun odun tozunu ham madde olarak kullanmaktadır (Zengin vd., 2020). Türkiye de kullanılan odun miktarı 400.000 ton iken odun peleti potansiyeli yaklaşık 1,8 milyon tondur. Biyopeletler, kullanılan biyokütle kaynaklarına göre değişmektedir. (Toksoy vd., 2020). Pelet üretimi için genelde çam ağacı ve diğer ağaç türleri kullanır. Ankara'da mobilyacılar ve ağaç işleme fabrikaları gibi çok sayıda işletme bulunduğundan pelet üretimi için bu hammaddeler kullanılmaktadır. Karadeniz Bölgesi de ormancılık faaliyetlerinden dolayı orman ürünleri ve atıkları pelet üretimi için kullanılmaktadır. Ege ve Akdeniz bölgelerinde çok sayıda zeytin ağacı ve zeytinyağı fabrikası bulunduğu için zeytin prinası pelet üretiminde kullanılmaktadır (Karaca, 2021).

%10'dan az nem içermesi ve yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle diğer katı yakıtlara göre odun peleti enerji elde etmek için tercih edilen alternatif yakıtların başında gelmektedir. Türkiye'de 50,2 GJ ısıtma enerjisi için yaklaşık 2 ton kömür, 1142 kg akaryakıt, 1454 m<sup>3</sup> doğal gaz veya 2,66 ton odun peleti gereklidir (Toksoy vd., 2020). Ayrıca peletler fosil yakıtlara göre daha temiz bir yakıttır. Kömürün biyopeletlerle birlikte yakılmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonlarının azalır. 1 ton benzinin yanması sonucu 3,11 ton CO<sub>2</sub> atmosfere salınırken, 1 ton kuru biyokütlenin yanması sonucu atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı

0,467 ton'dur (Tüplek, 2011). 1 MWh enerji üretimi sırasında pelet, fuel-oil ve doğal gazın atmosfere verdiği CO<sub>2</sub> miktarları sırası ile 68 kg, 342 kg ve 228 kg olarak bilinmektedir (Çelik, 2011). 1 MWh enerji üretimi için odun peletine karşın doğal gaz 3 kat, fuel oil 5 kat ve elektrikle ısıtma da atmosfere 10 kat daha fazla CO<sub>2</sub> salar (Toksoy vd., 2020).

#### **4. BİYOBİRİKET**

Ormanlardan elde edilen odun ve ağaç artıkları, odun peleti ve briketlerine dönüştürülmesi sonucunda evler ve binalar ısıtılırken, biyokütle santrallerinde veya termik santrallerde kömür ile birlikte ortak yakılarak elektrik üretilmektedir. Biyobriketler, biyokütlenin biyopelet üretimindeki gibi biyokütlenin öğütülmesi kurutma ve sıkıştırma işlem basamaklarından sonra elde edilir. Briketleme ile biyokütlenin yoğunluğu 100-200 kg/m<sup>3</sup>'den 1200 kg/m<sup>3</sup>'e artar (Topkoç, 2023). Briket, küçük parçalar halindeki katı yakıtların yapıştırıcılı ya da yapıştırıcısız olarak basınçla şekillendirilmesi ve katılaştırılması işlemi ile çentiklenmiş, ezilmiş ya da toz haline getirilen biyokütle materyalinin kesmeler şeklinde sıkıştırılması veya glomerüleştirilmesi ile 25 mm çaptan daha büyük uniform bir yakıttır. Briketlerin çapları ve boyları, peletlerden daha fazladır. Pelet çapı 6-16 mm ve uzunluğu 20-30 mm iken briketin çapı yaklaşık 65 mm ve uzunluğu 25-200 mm'dir. Pelet ve briketlerin yoğunlukları ile nem içerikleri arasında önemli bir fark yok iken briketin ısı değeri ve kül içeriği peletlerden daha fazladır (Acaroğlu ve Haciseferoğulları, 2014; Demirel ve Gürdil, 2014; Topkoç ve Yıldız, 2021).

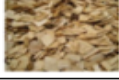
Sıcaklığa göre briketlemede iki şekilde yapılır; sıcak briketleme ve soğuk briketleme. Sıcak briketlemede, öğütülerek parçacık boyutu düşürülen biyokütle materyali ısıtılır ve ısı etkisiyle yumuşayan materyal ise yapıştırma özelliği kazanan bir

biyokütle ile birleştirilir. Soğuk briketleme de ise biyokütle materyali ısıtılmadan briketleme işlemi yapılır. Briketleme işlemi sonucunda biyokütlenin hacimsel ısı değeri artar, taşıma ve depolama masrafları azalır, yakıt ve yanma özellikleri iyileşir. Briket haline getirilen biyokütlenin yakılmasıyla atmosfere daha az partikül emisyonları salınır diğer taraftan aynı boyutlarda ve şekillerde daha kaliteli ve iyi bir yakıt elde edilir (Acaroğlu ve Hacıseferoğulları, 2014).

Ayrıca biyobriketler kömürden daha iyi yanma özelliklerine sahip olduğundan kömür ya da odun yerine kullanılabilecek bir yakıttır. Biyobriketler, pişirme testlerinde yakacak odun veya hayvan gübresine göre üstün ve LPG ile karşılaştırılabilir bulunmuştur. Biyobriketlerin, kömür veya linyitten daha iyi yakıt ve yanma özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Topkoç, 2023).

Tablo 1’de görüldüğü üzere odun talaşının nem içeriği % 30-55 iken pelet ve briketle dönüştürüldüğünde nem içeriği % 10’un altına düşmekte, biyokömür elde edildiğinde %5’in altına düşmektedir. Odunun alt ısı değeri ise odun peletine dönüştürüldüğünde yaklaşık 2 kat, odun briketine dönüştürüldüğünde 3 kat ve odun kömür elde edildiğinde yaklaşık 4 kat artar. Odun briketi, odun peleti ile neredeyse aynı nem içeriği ve parça yoğunluğuna sahipken alt ısı değeri daha yüksektir. Odun kömürü odun briketine göre yaklaşık 1.5 kat daha fazla alt ısı değere sahipken parça yoğunluğu da yaklaşık 3 kat daha azdır (Yıldız, 2023).

**Tablo 1. Odun Talaşı, Odun Peleti, Odun Briketi ve Odun Kömürü Bazı Yakıt Özellikleri**

|                          | Odun talaşı                                                                       | Odun peleti                                                                       | Odun briketi                                                                      | Odun kömürü                                                                       |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Teknik Özellikler</b> |  |  |  |  |
| Nem (%w:w)               | 30-55                                                                             | 7-10                                                                              | 7-12                                                                              | 1-5                                                                               |
| Alt ısı değeri (kcal/kg) | 1673-2868                                                                         | 3585-4063                                                                         | 5500-6000                                                                         | 7170-7648                                                                         |
| Parça yoğunluğu (kg/l)   | 0.20-0.30                                                                         | 0.55-0.65                                                                         | 0.55-0.65                                                                         | 0.18-0.24                                                                         |
| Biyolojik bozunurluk     | Hızlı                                                                             | Orta                                                                              | Orta                                                                              | Yok                                                                               |
| Öğütme gereksinimi       | Özel                                                                              | Özel                                                                              | Özel                                                                              | Standart                                                                          |
| Ürün kararlılığı         | Sınırlı                                                                           | Yüksek                                                                            | Yüksek                                                                            | Yüksek                                                                            |
| Taşıma ücreti            | Yüksek                                                                            | Orta                                                                              | Orta                                                                              | Orta                                                                              |

## 5. BİYOKÖMÜR

Ülkemizin yüzölçümünün %58'i tarım ve orman alanları ile kaplı olması nedeniyle 109.4 milyon ton bitkisel ve hayvansal atık açığa çıkmaktadır. Bu atıklar, biyokömüre dönüştürülerek yakıt ihtiyacımızın bir kısmı karşılanabilir (Sönmez ve Çığ, 2019). Biyokütle biyokömüre dönüştürüldüğünde enerji yoğunluğu ve ısı değeri artar, uzun süre bozulmadan depolanabilir, depolama ve taşıma maliyetleri daha az olur. Biyokömür, kömür gibi kolay nem almaz ve öğütülebilir. Özellikle biyokütlenin termik santrallerde yakıt olarak kullanılması durumunda, biyokütlenin homojen ve sürekli bir şekilde reaktöre beslenememesi önemli bir sorundur. Ayrıca, biyokütle nem içeriği, düzenli ve kontrollü bir yakma/gazlaştırma işlemlerinde belirli bir aralıkta kalması istenir. Bu istenen yakıt özellikleri, kömürde kolayca sağlanırken biyokütlerde teknik ve ekonomik olarak daha zor sağlanır. Kuru ve öğütülebilir özellikleri nedeniyle biyokömür, pulverize kömür santrallerinde, pulverize kömürlü gazlaştırıcılarda ortak yakıt olarak kullanılabilir. Tablo 2 de görüldüğü üzere

biyokömürün ısı değeri kömüre yakın bir değerdedir ve nemi daha düşüktür ( $\leq$  % 5). Kömüre kıyasla daha az kül (kuru bazda % 0.7-5) içerir ve daha reaktiftir. Kömürle birlikte ortak yakıt olarak kömüre %10-15 oranında biyokütle katılırken, biyokömür de % 50' ye kadar kömüre ilave edilmektedir (Olgun vd., 2014).

Biyokömür hammadde kaynağı olarak odun yongası, saman, mısır koçanı, pirinç kabuğu, kuruyemiş kabukları, ağaç kabuğu gibi tarımsal atıklar, bahçe atıkları, kağıt atığı, tavuk tüyleri, hayvan gübresi, kanalizasyon çamuru, kentsel atıklar ve orman atıkları kullanılabilir. Bu nedenle atık biyokütleden biyokömürü üretimi, organik atıkların yönetimi için yeni bir yol sunmaktadır. Biyokömürün kimyasal kompozisyonu, hammadde türüne göre değişir. Biyokömür, biyokütlenin yüksek sıcaklıklarda ve oksijensiz ortamda ısıtılması (pirolizi) sonucunda elde edilmektedir. Biyokömürün özellikleri kullanılan biyokütle türüne ve piroliz koşullarına göre değişmektedir. Selüloz, hemiselüloz, lignin ve uçucu madde oranı biyokütle türüne göre değiştiğinden aynı karbon oranına sahip biyokömürlerin yüzey özellikleri, yüzey alanı veya gözeneklilik gibi önemli fizikokimyasal özellikleri farklıdır (Akgül, 2017).

Modern biyokömür endüstrisi kısmi olarak yeni olmasına rağmen biyokömür yüzyıllar boyunca doğada kendiliğinden oluşmaktadır. Dünyada biyokömür çalışmaları yoğunlukla Amerika, Avrupa ve Çin'de yapılmaktadır (Akgül, 2017).

**Tablo 2. Biyokütle Kömür Yakma Sistemleri İçin Yakıt Özellikleri**

|                                       | Odun     | Odun peleti | Biyokömür peleti | Mangal kömürü | Kömür     |
|---------------------------------------|----------|-------------|------------------|---------------|-----------|
| Nem miktarı (% Ağ.)                   | 30-45    | 7-10        | 1-5              | 1-5           | 10-15     |
| Alt ısı değeri (MJ/Kg)                | 9-12     | 15-18       | 20-24            | 30-32         | 23-28     |
| Uçucu madde (% kb)                    | 70-75    | 70-75       | 55-65            | 10-12         | 15-30     |
| Sabit karbon (kb)                     | 20-25    | 20-25       | 28-35            | 85-87         | 50-55     |
| Yığın yoğunluğu (kg/l)                | 0,2-0,25 | 0,55-0,75   | 0,75-0,85        | 0,20          | 0,8-0,85  |
| Enerji yoğunluğu (GJ/m <sup>3</sup> ) | 2,0-3,0  | 7,5-10,4    | 15,0-18,7        | 6-6,4         | 18,4-23,8 |
| Toz                                   | Orta     | Sınırlı     | Sınırlı          | Yüksek        | Sınırlı   |
| Su tutma özelliği                     | Nem alır | Nem alır    | Nem almaz        | Nem almaz     | Nem almaz |
| Biyolojik bozulma                     | Var      | Var         | Yok              | Yok           | Yok       |
| Ufalanma                              | Zayıf    | Zayıf       | İyi              | İyi           | İyi       |
| Yükleme boşaltma                      | Özel     | Özel        | İyi              | İyi           | İyi       |
| Kalite değişkenliği                   | Yüksek   | Sınırlı     | Sınırlı          | Sınırlı       | Sınırlı   |

En bilinen biyokömür üretimi odun kömürü üretimi olup, Türkiye’de özellikle meşe ağaçlarından geleneksel yöntemlerle mangal kömürü üretimi yaygındır. Türkiye de geleneksel odun kömürü üretimi için düzgün şekilde istiflenen odunlarla torluklar kurulur ve üzeri toprakla kaplanarak içten içe yanma ile karbonizasyon meydana gelir. Endüstriyel üretimi, sürekli veya kesikli olarak farklı tiplerde reaktörlerde yapılır.

Biyokömür, daha az sera gazı salınımını yapan yenilenebilir, yerli bir yakıt olarak kullanılmasının yanısıra topraktan fosfor ve azot gibi elementlerin bitkiler tarafından daha kolay alınabilmesini sağlayarak toprağı iyileştirir (Dursun, 2020). Biyokömür, bozulmaya karşı dirençli olan yapısı, yüksek spesifik yüzey alanı ve negatif yüzey yükü olmak üzere sahip olduğu bazı özelliklerinden dolayı toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirebilecek ve bitkisel üretimin verimliliğini arttırabilecek bir katkı maddesi olarak düşünülmektedir. Biyokömür yüksek oksijen içeriğine sahip olmasından dolayı, yüksek yüzey asit-baz fonksiyonel faaliyetleri yürütmesinden dolayı filtasyon için de kullanılır. (Akgül, 2017).

## **KAYNAKLAR**

- Acaroğlu, M., Haciseferoğulları, H. (2014). Biyokütle Enerjisinde Briketleme ve Peletlemede Yeni Test Prosedürleri, Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştay, 28-29 Mayıs 2014, Samsun.
- Akgül, G. (2017). Biyokömür: Üretimi ve Kullanım Alanları. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(4), 485-499.
- Ar, F. F. (2018). Ottan Çöpten enerji, Enerji ve Çevre, 143:22-25.
- Atay, A. O., Ekinci, K., Umucu, Y. (2016). Yağ Güllü Damıtma Atıkları, Kızılçam Kabuğu ve Linyit Kömür Tozundan Elde Edilen Peletlerin Baca Gazı Emisyonlarının Belirlenmesi. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 13(2), 1-9.
- Aydemir, T. (2017). Farklı Tarımsal Artıklar Kullanılarak Hazırlanan Karışım Peletlerinde Kenevir Sapı Kullanımının Pelet Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Tekirdağ.
- Baydemir, T. (2023). Umudumuz Biyoyakıtlarda Mı? Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, 14-31.
- Bilgin, S., (2008). Sera Bitkisel Biyokütle Atıklarının Briketlenmesi, Briket Özelliklerinin ve Yanma Sonu Gaz Emisyonlarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Antalya. (Erişim Tarihi: 30.07.2021)
- Çelik, B., (2011). Pellet Üretim Tesisinin Fizibilitesi: Bartın Örneği. Yüksek Lisans. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın Üniversitesi.
- Demirel, B., Gürdil, G. A. K. (2014). Tarımsal Faaliyetler Sonucu Açığa Çıkan Atık/Artıkların Katı Biyoyakıt Olarak

Değerlendirilmesi, Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı, 28-29 Mayıs 2014, Samsun.

- Dok, M., Çelik, A. E., Aksoy, M., Yücel, C. (2021). Çukurova koşullarında yetiştirilen tatlı sorgum posasından elde edilen peletlerin yanma özelliklerinin belirlenmesi. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 5(4), 820-832.
- Dursun, N. (2020). Hayvansal ve Bitkisel Atıklar Kaynaklı Biyokömür Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi: Malatya İli Örneği. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 720-727.
- Granada, E., González, L. M. L., Míguez, J. L., Moran, J. (2002). Fuel Lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy*, 27; 561-573.
- Güllü, M., Bayraç, H. N. B. (2017). Biyoyakıt Üretimi, Karbon Emisyonu ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Amerika, Brezilya ve Almanya Örnekleri. *Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler Dergisi*, (64), 18-34.
- Işık, S., Yavuz, S. (2022). Biyokütleden Elde Edilen Biyoyakıtlara Genel Bir Bakış. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34), 193-201.
- Karaca, N. K. (2021). Türkiye Pelet Yakıtı Sektörünün Mevcut Durumu ve Gelecek Öngörülleri: Bir Anket Çalışması. ODTÜ, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi
- Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H. H., Akdemir, Ş. (2015). Tarımsal Artıklardan Biyopelet Üretimi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 29 (2).
- Olgun, H., Keivani, B., Ersöz, Ö., Koçar, G. (2014). Biyokömürün Termokimyasal Enerji Dönüştürme

Sistemlerinde Kullanılması. Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar  
4. Ulusal Çalıştay, 28-29 Mayıs 2014, Samsun.

pcw.com.tr, Biyokütle ve Biyoenerji Sektörlerine Genel Bakış,  
2021.

Sönmez, F., Çığ, F. (2019). Artan Dozdaki Biyokömür ve  
Solucan Gübresi Uygulamalarının Buğdayda ve Toprakta  
Besin Elementi İçeriği Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi.  
KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi, 22(4): 526-536.

Sözen, E., Gündüz, G., Aydemir, D., Güngör, E. (2017).  
Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık Ve  
Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi. Bartın Orman  
Fakültesi Dergisi, 19(1), 148-160.

Toksoy, D., Çolak, S., Bayramoğlu, M. M. (2020). A Study on  
The Biomass Energy Potential of Turkey: Example of  
Wood Pellets. Journal of Anatolian Environmental and  
Animal Sciences, 5(5), 867-871.

Topkoc, E., Yıldız, Z. (2021). Alternatif Bir Katı Yakıt Olarak  
Biyopeletler, 5th International Applied Sciences  
Congress, Mersin.

Topkoç, E. (2023). Çeşitli Tarımsal Atıklardan Elde Edilen  
Biyopeletlerin Bazı Yakıt Özelliklerinin  
Değerlendirilmesi, Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim  
Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği ABD, Mersin.

Tüplek, A., (2011). Odun Talaşı ve Tozundan Pelet Biyoyakıt  
Üretilmesi ve Yanma Analizi. Yüksek Lisans.  
Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Uçar, T., Yumak, H. (2001). Biyokütle Yakacakların  
Briketlenmesinde Kullanılan Teknolojiler, Yenilenebilir  
Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, 12-13 Ekim,  
S:221-229, Kayseri.

- Yıldız Z. (2023). Biyopelet ve Biyopelet Standartları. Ziraat & Orman, Su Ürünleri Alanında Akademik Çalışmalar. Gece Kitaplığı.
- Yılmaz, H., Topakcı, M., Çanakcı, M., Karayel, D. (2021). Çim Peleti Üretiminde Kalıp Delik Çapı ve Nem İçeriğinin Üretim Parametreleri ve Pelet Fiziksel Özelliklerine Etkisi. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi, 9(1), 47-56.
- Yılmaz, H., Topakcı, M., Karayel, D., Çanakcı, M. (2021). Pirinanın Farklı Nem İçeriklerinde Peletlenmesi İşleminin Peletlerin Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkileri. Mediterranean Agricultural Sciences, 34(1), 55-61.

# **SERA GAZI METANIN (CH<sub>4</sub>) YÖNETİMİ: EMİSYON KAYNAKLARI VE KÖMÜR YATAĞI METANININ SAFLAŞTIRILMASINA YÖNELİK GÜNCEL YAKLAŞIMLAR**

**Hazal ÖZTAN<sup>1,2</sup>**

**Duygu UYSAL<sup>2,3</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Küresel enerji tüketimi, fosil yakıt kullanımı ve fiyat krizleri ile birlikte dünyada enerjiye olan ihtiyacın hızla artması ülkelerin başlıca sorunlarından biridir. Enerji üretiminde fosil yakıtların kullanımı sonucu atmosferde artan sera gazı konsantrasyonu ve bunun sonucunda yaşanan küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunları ise ülkelerin gerekse hem ekonomik alanda hem de siyasi alanda ciddi uğraşlar verdiği bir durum haline gelmiştir. Başta Avrupa ülkeleri olmak üzere pek çok ülke atmosferdeki sera gazlarını azaltmaya, yeşil bir ekonomi planı oluşturmaya ve üretimde karbon vergilerini düzenlemeye yardımcı yolların arayışları içerisinde. Bunun için çeşitli iklim anlaşmaları, 2030-2050 hedefleri ve mutabakatlar düzenlenmektedir. 11 Aralık 2019 yılında Avrupa Birliği Komisyonu (AB) tarafından Avrupa Yeşil Mutabakatı imzalanmıştır. Kaynaklardan bağımsız bir büyümeyi ele alan ekonomik bir model oluşturmak ve bu model dahilinde tüm

---

<sup>1</sup> MSc., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, hazaloztan@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1456-7238

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Merkez Kampüs, 06500 Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Doç. Dr., Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, duysal@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8963-6026

ülkeleri ve sektörleri kapsamına almak Avrupa Yeşil Mutabakat'ın ana amaçlarıdır. Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050 yılına kadarki sürede, bilimsel olarak izlenecek yollar yardımıyla sera gazlarının azaltılması hedeflenmektedir. Avrupa Yeşil Mutabakatı, Paris Anlaşması ile de uyum içindedir ve mutabakatın temel hedefleri kaynaklarda sunulmuştur: (Aşıcı & Acar, 2022; Özerdem, 2024).

- Karbon nötr olma hali
- Karbon fiyatlandırmasına odaklanan 2030 ve 2050 için iklim hedefi
- Temiz, uygun ve güvenli enerji
- Endüstriyel olarak temiz ve döngüsel bir ekonomi stratejisi
- Sürdürülebilir ve akıllı hareketlilik
- Ortak tarım politikasının yeşilleştirilmesi / tarladan sofraya stratejisi
- Biyolojik çeşitliliğin korunması
- Sıfır kirlilik, toksik olmayan bir çevre arzusu
- Tüm AB politikalarında (ticaret ve dış politika dahil) sürdürülebilirliğin yaygınlaştırılması
- Küresel bir lider olarak AB'yi konumlandırma
- Avrupa İklim Yasası

2030 hedefleri için ise hızlı sonuçların elde edilebileceği hedefler belirlenmiştir. Bunun için Avrupa Komisyonu, ulaşım araçlarından kaynaklanan emisyonları sıfıra indirmeyi hedeflemiştir. Bu bağlamda elektrikli ve H<sub>2</sub> 'le çalışan araçların yaygınlaştırılmasını ve ayrıca temiz yakıtlara yönelimin artmasını desteklemektedir. Sadece karayollarındaki ulaşım için değil hava

ve deniz taşımacılığı için de karbon fiyatlandırmasına gidilmesini önermektedir. Enerji verimliliğinde artışın bir başka yolu olarak binaların yenilenmesini de hedefleri arasında bulundurmaktadır. Enerji verimliliğinin sağlanması adına Avrupa Komisyonu, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Bunun için %40'lık bir payı yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımına yöneltmiştir. Yenilebilir enerji kaynakları içinde günümüzde ulaşımda ve endüstride dikkatleri çeken H<sub>2</sub> olmakla birlikte Avrupa Birliği de H<sub>2</sub> kullanımını desteklemektedir (Öztan, Çapoğlu, Uysal, & Doğan, 2023; Uysal, Öztan, Gafur, & Doğan, 2022; Yörük, Uysal, & Doğan, 2025).

Ülkemiz açısından gelişmeler incelenecek olursa, ilk olarak Türkiye büyüyen nüfusuyla gelişmekte olan bir ülkedir. 2021 yılında Türkiye'nin nüfusu 84,9 milyona yaklaşırken, yıllık nüfus artış hızı ise yüzde %1,3 civarında gerçekleşmiştir. Türkiye ekonomisi aynı yıl neredeyse %11,0 büyümüş ve kişi başına satın alma gücü paritesine (SAGP) göre küresel gayri safi yurt içi hasılanın (GSYİH) yaklaşık %2,6'sını üretmiştir. Türkiye'nin büyümesi, 2021 yılında, Kovid-19'a yönelik tedbirlerin kademeli olarak azaltılması ve dünya genelinde hükümetlerin para politikasını gevşetmesi sonucunda Yirmiler Grubu (*Group of Twenty Countries*) arasında en yüksek orana ulaşmış durumdadır. Türkiye'nin GSYİH ve sera gazı emisyonları da benzer artış trendleri izlemiştir (Özdemir, Pehlivan, & Melikoğlu, 2024). GSYİH'deki herhangi bir azalmanın sera gazı emisyonları üzerinde doğrudan etkisi olacağı da çalışmalarda bilinmektedir (Zou ve diğ., 2023).

Türkiye şu ana kadar elektrik üretiminde ithal fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmış dolayısıyla yenilenebilir enerji kapasitesini artırarak enerji harcamalarını da azaltmıştır. Ancak, Türkiye sera gazı emisyonlarını azaltmaktan hâlâ çok uzak bir konumdadır. Türkiye, her zamanki gibi iş (Business as Usual-BaU) senaryosuna dayalı olarak sera gazı emisyonlarını

2030 yılına kadar %21 oranında azaltmak için 2016 yılında Paris Anlaşmasını imzalayan ülkeler arasındadır (Özdemir ve diğ., 2024). 2050'li yıllara kadar karbon nötrlüğüne ulaşabilmek (*Net Zero Scenarios*), Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak ve yeşil ekonomi düzenlemeleri için de hayati öneme sahiptir (Chen, Ma, & Xiang, 2023; Oğul, 2023; Veysikarani & Akdağ, 2024). Türkiye, Yeşil Mutabakatı takip edecek şekilde, Avrupa Yeşil Mutabakatı Eylem Planı'nı 9 kategoride 32 hedef ve 81 eylem planı ile açıklayarak planladığı başlıkları sunmuştur (Aşıcı & Acar, 2022; Özerdem, 2024).

- Sınırdaki karbon düzenlemeleri
- Döngüsel yeşil bir ekonomi
- Yeşil, ekonomik ve güvenli enerji arzı
- Sürdürülebilir tarım
- Avrupa Yeşil Mutabakatı'na yönelik bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri
- İklim değişikliği ile mücadele
- Yeşil finansman
- Sürdürülebilir akıllı ulaşım ve diplomasi

Günümüzde sera gazı konsantrasyonlarının atmosferde hızlı şekilde artması sonucu küresel ısınmanın yaşanması ve iklim değişiklikleri, temelde fosil yakıt kaynaklı karbonlu emisyonların bir sonucudur. Fosil yakıt kaynaklı enerji üretiminden dolayı CO<sub>2</sub> emisyonlarının olduğu çok iyi bilinmekle beraber, 2024 Eylül itibarı ile Mauna Loa gözlem evinin verilerine göre atmosferdeki konsantrasyonu 422,19 ppm'dir (DailyCO<sub>2</sub>). Sera gazları içinde CO<sub>2</sub>'ten sonra ikinci sırada CH<sub>4</sub> gazı emisyonu yer almaktadır ve atmosferdeki etkisi CO<sub>2</sub>'ten 28 kez daha fazladır. Günümüzde atmosferdeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu hızla artarak Ocak 2020'de 1893 ppb'yi aşmıştır (Karimi & Fatemi, 2021; Moradi, Azizpour,

Bahmanyar, Rezamandi, & Zahedi, 2021). 325 megatondan fazla tahmin edilen yıllık emisyonunda CH<sub>4</sub>, 2015'teki genel sera gazı emisyon artışının yaklaşık %16'sını oluşturmuştur (Moradi ve diğ., 2021). Kimyasal olarak bakıldığında ise CH<sub>4</sub> gazı, kokusuz, renksiz ve sudaki çözünürlüğü çok az olan kimyasal bir gaz olup hidrokarbonların en basit yapıdaki üyesidir. Molekül geometrisi düzgün dört yüzlü (tetrahedral) olup sp<sup>3</sup> hibritleşmesi göstermektedir. Havadan daha hafif olmakla birlikte %5-17 arasındaki hava ile karışımları patlayıcıdır (İTÜ, 2023; Wermac, 2023).

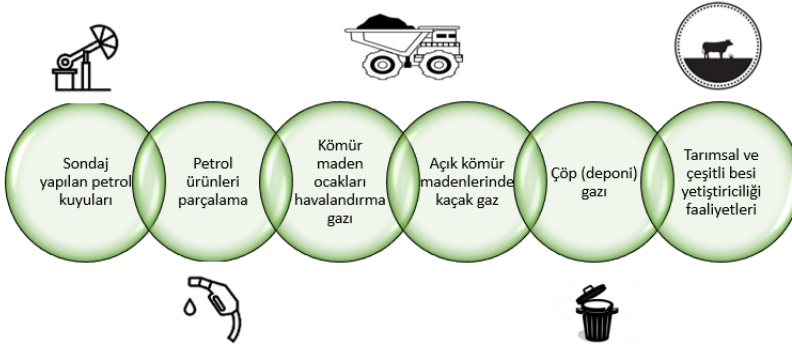
Bu çalışma, gün geçtikçe atmosferdeki konsantrasyonu hızla artan CH<sub>4</sub> gazının antropojenik emisyon kaynakları ile CH<sub>4</sub> saflaştırma teknolojilerinin temel kimya mühendisliği yaklaşımı ile açıklandığı kısa bir derleme çalışmasıdır. Bölüm 2'de sondaj yapılan petrol kuyuları, kömür maden ocaklarından havalandırma ile çekilen gaz, açık kömür madenlerinden çıkan kaçak gaz ve kömür yatağı metanı, çöp gazı, tarımsal ve çeşitli besi yetiştiriciliği faaliyetleri olmak üzere antropojenik CH<sub>4</sub> emisyon kaynakları bu alanda yapılmış güncel çalışmalar yardımı ile anlatılmıştır. Bölüm 3'te CH<sub>4</sub> saflaştırma teknolojileri olan absorpsiyon, kriyojenik damıtma, membran ayırma ve son olarak adsorpsiyon süreçlerinin, CH<sub>4</sub> saflaştırma ve gaz ayırma işlemleri için önemi, amacı, temel olarak nasıl bir yöntem izlendiği ve avantajları ile dezavantajları bakımından özetlenmiştir. Son olarak sunulan Bölüm 4'te, spesifik olarak kömür yatağı metanına yönelik olarak son yıllarda yapılan literatür araştırmalarındaki mevcut ihtiyaçlar belirlenerek sunulmuştur. Ayrıca, adsorpsiyon çalışmaları içinde günümüzde önemi ve kullanımı hızla artan ve özellikle kömür yatağı metanının tutulması ve zenginleştirilmesinde büyük rol oynayan PSA/VPSC/DR-VPSC (*Pressure Swing Adsorption/ Vacuum Swing Adsorption/ Dual-Reflux*) sistemlerine yönelik yapılan literatür çalışmalarından da örnekler Bölüm 4'te sunulmuştur.

## 2. SERA GAZI OLARAK CH<sub>4</sub> VE EMİSYON KAYNAKLARI

İnsan kaynaklı etkiler sonucu atmosfere CH<sub>4</sub> salınımı olan alanlar sondaj yapılan petrol kuyuları, kömür maden ocaklarından havalandırma ile çekilen gaz, açık kömür madenlerinden çıkan kaçak gaz, çöp gazı, tarımsal ve çeşitli besi yetiştiriciliği faaliyetleridir (Şekil 1) (Bacaksız & Azman, 2022; Hu ve diğ., 2022; Oğuz, 2024). Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC'ye göre küresel CH<sub>4</sub> emisyonlarının %50 ila %65'inden insan aktiviteleri sorumludur (IPCC, 2007). Ülkeler açısından bakıldığında insan popülasyonu sebebi ile Çin, CH<sub>4</sub> emisyonunda ilk sırada yer alırken ardından Amerika Birleşik Devletleri (ABD) gelmektedir (IEA, 2022). Enerji sektöründen kaynaklanan CH<sub>4</sub> emisyonu ise kaynaklar içinde ilk sırada yer alır (Chovancová, Zambrano-Monserrate, Bergougui, Ahakwa, & Dam, 2024). Petrol rafinerilerinde ve gaz üretim-dağıtım sistemlerinde CH<sub>4</sub> gazı kaçakları olabilmektedir. **Petrol ve gaz endüstrisinden** kaynaklanan emisyonlar, küresel CH<sub>4</sub> emisyonunun %40'ını oluşturmaktadır (IEA, 2024). Petrol ve doğal gaz sahalarında yer altından yakıt çıkarıldığı sırada kontrolsüz gaz sızıntıları meydana gelir. Doğal gaz üretiminde kuyu tamamlama ve hidrolik kırılma gibi işlemler sırasında, CH<sub>4</sub> sızıntılarının artabileceği belirtilmiştir. Bu işlemler haricinde petrol üretimi sırasında alevlenme (*flaring*) işleminde CH<sub>4</sub>'ın hepsi yanmayabilir ve bir miktar CH<sub>4</sub> havaya karışır. Ayrıca, havaya bırakılma (*venting*) sırasında ise CH<sub>4</sub> doğrudan atmosfere salındığından karbon ayak izi bakımından oldukça sorunlu bir adımdır. Bunların yanı sıra, boru hatlarında vanalarda ve doğal gaz tesislerinin havalandırılmasında da önemli CH<sub>4</sub> sızıntıları meydana gelmektedir. Özellikle bu işlemler sırasında meydana gelen CH<sub>4</sub> emisyonları son yıllarda gelişen uydu ve drone teknolojileri sayesinde anlık olarak görüntülenip kaydedilebilir hale gelmiştir. IEA (*International Energy Agency*) 2024

verilerine göre ABD’de Permian Basın ve Cezayir’de Hassi Messaoud sahası ile Rusya doğal gaz boru hatlarında ciddi boyutlarda CH<sub>4</sub> sızıntıları kaydedilmiştir (IEA, 2024). Yakma ve havalandırma esnasında gerçekleşen bu kaçakların engellenmesi, CH<sub>4</sub> emisyonunu azaltmada küresel ısınma üzerinde kısa vadede en etkili yöntem olabileceği literatürdeki çalışmalarda oldukça geniş yer bulmaktadır (Sun, Ma, & Li, 2021).

**Şekil 1. Antropojenik CH<sub>4</sub> Gazı Emisyon Kaynakları**



Aleshina ve diğ. (2024) çalışmalarında CH<sub>4</sub> emisyonlarının belirlenmesi için başta kutuplar olmak üzere uygun arazi örtülerine ait veritabanı bilgisinin gerekliliğine işaret etmişlerdir. Arazi bilgisi veritabanına olan ihtiyaç, CH<sub>4</sub> emisyon kaynaklarının çok çeşitli ve değişken faktörlere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Aleshina, Delgado-Antequera, & Gemar, 2024). Sulak alanlardan (wetlands) gerçekleşen CH<sub>4</sub> emisyonları örnek verilecek olursa bu alanlar dünya üzerinde CH<sub>4</sub> salınan başlıca doğal kaynaklardan biridir. İnsan faaliyetleri sebebi ile organik maddelerin sulak alanlarda birikmesi sonucu oksijensiz (anaerobik) parçalanma yapan mikroorganizmalar CH<sub>4</sub> üretmektedir. İnsan faaliyeti arttıkça biriken organik madde miktarı da arttığından atmosfere salınan CH<sub>4</sub> miktarı da doğal olarak artmaktadır. Dolayısıyla artan emisyonlar ile küresel ısınma daha da hız kazanmaktadır. Bu durum literatürde **iklim ısınma döngüsü** (warming climate cycle) olarak adlandırılmış ve

CH<sub>4</sub> emisyonları için **pozitif geri besleme döngüsü** olarak tarif edilmiştir. Ayrıca, sulak alanlardan kaynaklanan emisyon tahminleri tam olarak belirlenememekle birlikte yaklaşık 127 ila 227 Mt/yıl olduğu rapor edilmiştir (Saunois ve diğ., 2019).

**Açık arazi** olarak düşünüldüğünde önemli CH<sub>4</sub> emisyon kaynaklarından biri de Kuzey Yarımkürede'ki permafrost katmanıdır. Permafrost, yüzeyi iki yıl veya daha uzun süredir donmuş halde bulunan, toprak ve kaya katmanıdır. Yaz aylarında üst kısmı eriyebilen permafrost, bitki kökü, organik ve biyolojik maddeleri içerdiğinden CH<sub>4</sub> emisyonuna neden olmaktadır. Permafrost katmanının %24'ünde CH<sub>4</sub> emisyonunun gerçekleştiği belirtilmiştir (Aleshina ve diğ., 2024). Turetsky ve diğerleri ise permafrost katmanının 2300 yılına kadar 60 ila 100 Gt karbon salabileceğini bildirmiştir (Turetsky ve diğ., 2019).

İnsani beslenme ihtiyacının bir sonucu olarak **hayvancılık sektörü** gelişmiştir. Ancak, hayvancılık sektörü ile birlikte gelen olumsuz çevresel etkilerin varlığı (toprak sağlığı, küresel ısınma, hava kalitesi, su kirliliği) çevresel sürdürülebilirlik açısından günümüz tartışma konularından biridir (Solomon, Gupta, & Ncho, 2023). Hayvancılık sektörünün CH<sub>4</sub> emisyonları açısından önemi büyüktür. Çünkü, insan kaynaklı (antropojenik) CH<sub>4</sub> emisyonlarının üçte biri çiftlik hayvanları tarafından salınmaktadır (Jackson ve diğ., 2020; L. Zhang ve diğ., 2022). Çiftlik hayvanları içinde geviş getiren hayvanlar (ruminantlar) enterik fermentasyon nedeni ile hayvancılık sektöründen kaynaklı CH<sub>4</sub> emisyonlarının yaklaşık %90'ını oluşturur (Kumari, Fagodiya, Hiloidhari, Dahiya, & Kumar, 2020). Geriye kalan yüzdelik dilimden ise özellikle domuzlardan (ruminant olmayan hayvanlar) kaynaklanan üretim ve gübre süreçlerindeki CH<sub>4</sub> emisyonları sorumludur (P. Xu ve diğ., 2019).

Doğal gazdan ayrı olarak antropojenik CH<sub>4</sub> emisyon kaynakları içindeki kömür maden ocaklarında **kömür yatağı**

**metanı** (*coal bed methane*) olarak adlandırılan ve enerji bakımından son derece kritik öneme sahip gaz akımları mevcuttur. Madenlerdeki süreç sırasında yan ürün olarak oluşan bu akımlar, kalorifik değerleri açısından önemli bir konuma sahip olup temiz enerji kaynağı olarak belirtilmektedir (H. Li ve diğ., 2019; D. Zhang ve diğ., 2022). Kömür yatağı metanı rezervuarları, çeşitli gazları içermekle birlikte oldukça karmaşık ve heterojendir. Gaz akımının içerdiği bileşikler başlıca ve yüksek konsantrasyonlarda olmak üzere CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub>'dır. Kömür yatağının konumuna, nem oranına ve çeşitli jeolojik oluşumlarına göre farklı konsantrasyonlarda H<sub>2</sub>O ve hidrokarbonları da içerebilmektedir. Kömür yatağı metan akımları konsantrasyonlarına göre düşük konsantrasyonlu ve yüksek konsantrasyonlu akımlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Düşük konsantrasyonlu CH<sub>4</sub> akımı %30'un altında bir oranda CH<sub>4</sub> içermektedir. Yüksek konsantrasyonlu akım, doğrudan elektrik üretimi için kullanılabilir bir halde iken düşük konsantrasyonlu akımın kullanımı kolay değildir. Dolayısıyla, düşük konsantrasyonlu akımlar doğrudan havaya salınmaktadır (Y. Yang, Y. Liu, ve diğ., 2022). Düşük konsantrasyonlu akımların kullanımı geleneksel sistemler ile ne kadar zor olsa da saflaştırma işlemleri ile zenginleştirilebilir. Saflaştırılan CH<sub>4</sub> akımları sıvılaştırılarak daha kolay depolanabilir ve taşınabilir hale gelirken aynı zamanda kömür yatağındaki enerji kaynağının da tam kullanımını sağlar (Pospíšil ve diğ., 2019). Kömür yatağı metanının saflaştırılması ve elde edilen CH<sub>4</sub> gazının doğal gaz kullanım hatlarına gönderilmesi için doğal gaz saflaştırma işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Doğal gazın saflaştırılması, borulama/taşıma maliyetlerinde etkili olmaktadır. Ekşi doğal gaz (*sour natural gas*) bileşimi, geniş konsantrasyon aralıklarında H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve hidrokarbon bileşikleri içerir. H<sub>2</sub>S ve CO<sub>2</sub> içerikleri satış gazı limitlerini aşarsa fazla konsantrasyon gaz tatlandırma (*sweetening*) adı verilen işlemle asidik gazdan ayrılmalıdır. Doğal gazdaki CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>, gazın ısıl değerini azaltır.

Ayrıca, asidik bir gaz olan CO<sub>2</sub> boru hatlarında korozyona neden olarak hatlara zarar vermektedir (Neishabori Salehi, Sharifnia, & Rahimpour, 2018).

Antropojenik kaynaklar içinde son olarak **çöp gazı** (deponi gazı) yer almaktadır. Katı atıklardan yayılan bu gaz ciddi oranda karbon emisyonuna neden olmaktadır. Saunois ve diğ. çalışmalarında, 2017’de 1,90x10<sup>9</sup> Mg CO<sub>2</sub>-eşdeğer/yıl değerinde emisyonun çöp depolama alanlarından gerçekleştiğini belirtmiştir (Saunois ve diğ., 2019). Bu değer küresel antropojenik CH<sub>4</sub> emisyonunun %18’i kadar iken toplam CH<sub>4</sub> emisyonunun %9’udur (Manheim, Yeşiller, Hanson, & Blake, 2024). Çöp depolama alanlarındaki gaz çıkışı, depolamadan sonraki geçen süreler göre değişmektedir (Aydın, Karakurt, & Aydın, 2011). İlk iki yılda gaz çıkışı en yüksek değerde gözlenirken gazın bileşimi de geçen süreye bağlı olarak değişmektedir. Tablo 1’de deponi gazına ait konsantrasyonların zamanla değişimi sunulmuştur. Çöplüklerden elde edilen CH<sub>4</sub> gazı ile konvansiyonel sistemlerde enerji üretimi Almanya’da Hofgeismar/Kassel şehrinde gerçekleştirilmektedir. Burada çöplükten elde edilen CH<sub>4</sub> ile elektrik üretilmekte ve bu elektrik ile kapalı yüzme havuzu, okullar, çocuk yuvaları ve konutlar ısıtılmaktadır (JMO, 2024).

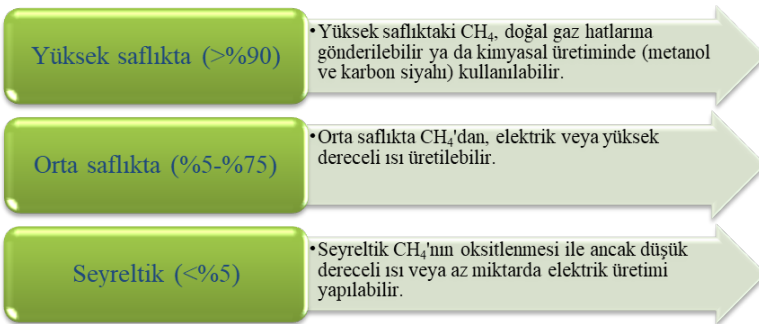
**Tablo 1. Deponi Gazın % Bileşimi ve Oluşma Süreleri**

| <i>Zaman (ay)</i> | <i>N<sub>2</sub></i> | <i>CO<sub>2</sub></i> | <i>CH<sub>4</sub></i> |
|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0-3               | 5,2                  | 88                    | 5                     |
| 3-6               | 3,8                  | 76                    | 21                    |
| 6-12              | 0,4                  | 65                    | 29                    |
| 12-18             | 1,1                  | 52                    | 40                    |
| 18-24             | 0,4                  | 53                    | 47                    |
| 24-30             | 0,2                  | 52                    | 48                    |
| 30-36             | 1,3                  | 46                    | 51                    |
| 36-42             | 0,9                  | 50                    | 47                    |
| 42-48             | 0,4                  | 51                    | 48                    |

**Kaynak:** (JMO, 2024)

CH<sub>4</sub> içeren akımların kullanımları, konsantrasyon yoğunluğuna göre çeşitlenmektedir. Bu kaynaklar konsantrasyonlarına göre üç grupta sınıflandırılmıştır: yüksek saflıkta (>%90), orta saflıkta (%5-75) ve seyreltik (<%5). Yüksek saflıktaki CH<sub>4</sub> doğalgaz hatlarına gönderilebilir ya da kimyasal üretiminde (metanol ve karbon siyahı) kullanılabilir. Orta saflıkta CH<sub>4</sub>, çöp gazı, kömür madeni drenaj gazı, anaerobik çürütücü gazı ve fosil oluşumlarından gelen düşük kaliteli gazı içerir. Orta saflıkta CH<sub>4</sub>'dan elektrik veya yüksek dereceli ısı üretilirken seyreltik CH<sub>4</sub>'ın oksitlenmesi ile ancak düşük dereceli ısı veya az miktarda elektrik üretimi yapılabilir. Etkin enerji kullanımı için düşük konsantrasyondaki CH<sub>4</sub> akımını orta saflıktaki konsantrasyona getirmek yada orta konsantrasyondaki akımda CH<sub>4</sub>'ı sıvı hale getirmek ve/veya satmak için yüksek saflığa getirmek tercih edilen işlemlerdir (Şekil 2) (Kim, 2013). Bu nedenle, CH<sub>4</sub> içeren emisyon kaynaklarındaki akımların zenginleştirilmesi daha çevreci bir motivasyon sağlarken atmosferdeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun azaltılması için emisyonun olduğu kaynaktan doğrudan CH<sub>4</sub> tutmak, hem çok daha kolay bir yaklaşım olacak hem de zenginleştirme ile tutulan CH<sub>4</sub>'ın kullanımını destekleyecektir (Javani, Maghsoudi, Darvishi Gilan, & Majidpour, 2021; Karimi & Fatemi, 2021; Moradi ve diğ., 2021).

**Şekil 2. Konsantrasyonlarına Göre CH<sub>4</sub> Emisyon Kaynaklarının Değerlendirilmesi**



Metan emisyon kaynaklarının ve bu emisyonların çevreye etkilerinin belirlenmesi, emisyonların ülke ekonomisi ve karbon vergileri açısından değerlendirilmesi için pek çok araştırma, inceleme ve derleme makale literatüre sunulmuştur. Günümüz çalışmalarında özellikle yeşil ekonomi, yenilenebilir kaynaklar ile enerji ihtiyacının karşılanması sırasında ekolojik olarak bırakılan karbon ayak izinin değerlendirilmesi geniş yer bulmaktadır. Ömer Faruk Temel 2024 yılı yayımlanan tezinde E-7 grubu ülkelerinin (Endonezya, Hindistan, Meksika, Çin, Brezilya, Türkiye) 2000-2020 yılları arasındaki verileri ile ekolojik ayak izi üzerinde yeşil finans kavramının etkilerini incelemiştir. Çalışmasında panel veri analiz yöntemini kullanarak yenilenebilir enerji tüketimi, reel gelir ve yabancı yatırımların ekolojik ayak izi üzerindeki etkilerini ekonometrik bir model ile açıklamıştır. Yeşil finans yatırımlarının %1’lik artışı ekolojik ayak izini 0,005 oranında azalttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, karbon ayak izinin çevre üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde yenilenebilir enerji kaynak kullanımının uzun vadede çevresel sürdürülebilirliği 0,327 oranında artırdığı belirtilmiştir (Temel, 2024). Tarımsal üretimde sera gazı emisyonlarının ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ve  $\text{NO}_2$ ) temel kaynakları, ilgili olduğu tüm sektörleri ele alacak şekilde (enerji tüketimi, toprak ve arazi kullanımı, bitkisel üretim, hayvancılık, depolama, biyoyakıt kullanımı, gübre üretimi vb. gibi) Öztürk’ün 2024 yılı yayımlanan “Tarımsal Üretimde Sera Gazı Emisyonları ve Karbon Ayak İzi Yönetimi” adlı kitabında detaylı şekilde sunulmuştur. Tarımsal açıdan  $\text{CH}_4$  emisyonlarının tüm özellikleri, çevre ve insan sağlığı açısından etkileri ile emisyonların azaltılmasına yönelik yollar incelenmiştir (Öztürk, 2024). Yapılan literatür çalışmalarında, sektörel süreçlerden ve bu süreçlerdeki parametrelerin  $\text{CH}_4$  emisyonuna etkileri de detaylı şekilde araştırılmaktadır. Tarımsal faaliyetli  $\text{CH}_4$  emisyonlarının incelendiği bir başka çalışmada, tarım ilaçlarının  $\text{CH}_4$  emisyonu üzerindeki etkileri, BRICS ülkeleri bazlı olmak üzere 1990-2019 yılları arasındaki veriler ile incelenmiştir.

Brezilya, Rusya, Hindistan, Çin ve Güney Afrika olmak üzere ülkelerdeki CH<sub>4</sub> emisyonlarının dönemsel olarak birbirinden farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Bu ülkelerde yetişen bitki türünün farklılığına bağlı olarak kullanılan gübre ve doğal olarak tarımsal ilaç miktarının da farklılık gösterdiği ifade edilmiştir. Çalışmada tarım ilacı satışındaki %1’lik artışın Brezilya’da %0,22 ve Güney Afrika’da %0,38 olacak şekilde CH<sub>4</sub> emisyonunu artıracak etkiye sahip olduğu raporlanmıştır. Ayrıca, istatistiksel çalışmada yer alan uzun dönem katsayısı CH<sub>4</sub> emisyonu için anlamlı bulunmuştur. Sonuç olarak, tarım ilacı kullanımının uzun vadede CH<sub>4</sub> emisyonunu artırıcı etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Tıraş, 2024).

Bacaksız ve Azman (2022) yayımladıkları çalışmada, hayvan beslemede tanen kullanımının fermantasyon ve sera gazları üzerindeki etkilerini derlemişlerdir. Tanenlerin bitki, kabuk ve köklerden yararlanılarak yapılan doğal kökenli polifenoller olduğu bilinmektedir. Gıda ve ilaç sektöründe oldukça geniş kullanım alanı olan tanenlerin hayvancılık sektöründe de yemleri saklamada, yüksek proteinli yemlerin silolanmasında ve hayvanların besin ihtiyaçlarını geliştirmede kullanıldığı ifade edilmiştir. Yapılan çalışmada, hayvancılık sektöründe ruminantların neden olduğu CH<sub>4</sub> emisyonlarının azaltılmasında tanen kullanımının olumlu yönde etkileri olabileceği belirtilmiştir. Tanenlerin hayvan yemlerine karıştırılarak kullanımının sera gazı üzerindeki etkisi yenilikçi bir hayvan besleme yaklaşımı olarak ifade edilmiş ve ayrıca tanen kullanımının amonyak bertarafında da tercih edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır (Bacaksız & Azman, 2022).

Odebiri ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, çiftlik hayvanlarının tarımsal göletlere girmesinin bu göletlerdeki CH<sub>4</sub> emisyonlarını artırdığına dair bir çalışma gerçekleştirmiştir. Tarımsal göletlerin diğer su kaynaklarına kıyasla birim alan başına daha yüksek CH<sub>4</sub> emisyonu yaptığını ifade etmişlerdir.

Çalışmalarında Avustralya’da bir test göletini çitle çevirerek göletten gerçekleşen CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonunu belirlemişlerdir. Çalışma yaz ve kış aylarında olmak üzere dönemsel davranışı da içermektedir. Çitle çevrilen göletlerde yaz aylarında CH<sub>4</sub> emisyonu %72, kışın ise %92 daha az gerçekleşmiştir. CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> akımları ise yazın %59 az gerçekleşirken yazın %73 daha az emisyon olduğu belirlenmiştir. Yaz aylarında daha az emisyon gerçekleşmesinde en önemli parametrenin ortalama günlük hava sıcaklığı olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra, çiftlik hayvanlarının suya girmesini engelleyerek su kalitesinin de arttığını ifade etmişlerdir. Çitle çevirme göletteki çözünmüş besin maddelerinin azalmasına dolayısıyla sudaki çözünmüş oksijenin artmasına neden olmaktadır (Odebiri, Archbold, Glen, Macreadie, & Malerba, 2024). Literatürde küresel ve tarımsal su ihtiyacına yönelik yapılan birkaç çalışmada daha çiftlik barajlarından gerçekleşen CH<sub>4</sub> emisyonları incelenmiştir. Bu çalışmaların ortak noktası, doğal sulak alanlardan ziyade hayvancılıkta sulama olarak kullanılan çiftlik gölet ve barajlarının atmosfere daha fazla CH<sub>4</sub> salımı yaptıklarıdır (Grinham ve diğ., 2018; Malerba ve diğ., 2022; Peacock ve diğ., 2021). Çünkü, yapılan bu çalışmalar göstermiştir ki gübre, dışkı ve yemlerden kalan organik artıklar da suya göletlere giren çiftlik hayvanları ile birlikte girmektedir. Doğal olarak suda artan organik maddeler anaerobik koşullar altında metanojenik bakteriler sebebi ile CH<sub>4</sub>’a dönüştürülür. Bu durum daha yüksek konsantrasyonlardaki CH<sub>4</sub> emisyonlarına neden olmaktadır (Ollivier, Maher, Pitfield, & Macreadie, 2019).

Kömür yatağı metan emisyonlarının değerlendirilmesi günümüz saflaştırma teknolojileri sayesinde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Ülkeler sahip oldukları kömür madenlerini en verimli şekilde kullanmanın yanı sıra kapalı ocaklardan atmosfere salınan havalandırma akımlarındaki mevcut CH<sub>4</sub> gazını da enerji haline dönüştürmenin yollarını aramaktadır. Bu

işlem düşük konsantrasyonlu metan akımlarının saflaştırılması için daha maliyetli bir yol olduğundan ekonomik açıdan da araştırmalar devam etmektedir. Wang ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada Çin'in Shanxi Eyaleti'ndeki kömür yatağından CH<sub>4</sub> elde etmek ve emisyonu azaltmak adına 87 adet kömür yatağı metanı çıkarma firması ile 61 adet CH<sub>4</sub> gazı kullanan firmanın verilerini kullanarak maliyet eğrilerini oluşturmuşlardır. Yazarlar, CH<sub>4</sub> gazı çıkarmada ve emisyonu azaltmada firmaların farklı maliyetler ile çalıştıklarını belirlemiştir. Burada esas nedenin madenlerin birbirinden farklı olmasından ziyade saflaştırmada tercih edilen teknolojinin farklılığından kaynaklandığı belirtmişlerdir. Çalışmada kömür yatağı metanından faydalanılması için en uygun yolun güç üretimi olduğu belirtilirken, güç üretiminin saflaştırma işlemlerine oranla daha etkin maliyet yönetimine sahip olduğu da raporlanmıştır. Aynı zamanda, kömür yatağı metanından faydalanılması adına teknolojik ekipmanların standartlarının oluşturulması, alt yapı güçlendirmesi ve AR-GE çalışmalarının teşvik edilmesine de son derece ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir (H. Wang ve diğ., 2024).

Kömür yatağı metanının güç üretim sistemlerinde kullanımını artırmaya ve sistemlerdeki problemleri çözmeye yönelik araştırmalar da devam etmektedir. Yüksek konsantrasyonlu kömür yatağı metanı (>%30), evsel ve endüstriyel alanlarda direkt yakıt olarak kullanılabilir haldedir. Ancak, düşük konsantrasyonlu kömür yatağı metanı (<%30) içten yanmalı motorlarda katalitik olarak yakılabilir, ancak mevcut sistemler düşük verimlilik göstermektedir (X. Wang ve diğ., 2020; Xiong ve diğ., 2021; Z. Yang ve diğ., 2022). Guo ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, katı oksit yakıt hücresinde düşük konsantrasyonlu kömür yatağı metanının kullanımı geliştirmek için Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizörünün verimliliğini incelemişlerdir. Geliştirdikleri katalizör, katı oksit yakıt hücrelerinde anot

malzemesi olarak nikel bazlı malzemeler tercih edildiğinde karbon birikimini önlemek amacıyla test edilmiştir. Anot üzerinde karbon birikimi, katı oksit yakıt hücrelerinde CH<sub>4</sub>'ın katalitik kısmi oksidasyon reaksiyonu için en büyük sorun olarak ifade edilmiştir. Sonuç olarak, Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizörünün %99,4 oranında CH<sub>4</sub> dönüşümü elde ettiği ve bu katalizörün hücre stabilitesini 750°C'de uzatabileceği raporlanmıştır. Ayrıca, güç üretimi için de Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katalizörü ile çalışan yakıt hücresinin 800°C'de 0,669 W/cm<sup>-2</sup> zirve güç yoğunluğuna ulaştığı belirtilmiştir (Z. Guo ve diğ., 2024). Bir başka çalışmada, Yang ve diğ. (2022) katı oksit yakıt hücresinde CH<sub>4</sub>'ın kısmi oksidasyonunu kolaylaştırmak adına anot tarafında kullanılmak üzere dikey mikro kanallara sahip bir alt tabaka kullanımını önermiştir. CH<sub>4</sub>'ın kısmi oksidasyonu sırasında anot tarafında düşük konsantrasyonlu CH<sub>4</sub> akımlarının ve reaksiyon ısısı sonucunda oluşan termal dalgalanmanın önüne geçebilmek için, mikro kanallı fonksiyonel bir tabaka kullanmışlardır. Mikro kanallara yüksek derecede Ni-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce<sub>0,5</sub>Zr<sub>0,5</sub>O<sub>2</sub> katalizörü emdirilmiştir. Çalışma sonucunda, hücre performansı 904 mW/cm<sup>-2</sup>'den 1208 mW/cm<sup>-2</sup>'ye yükselmiştir. Ayrıca, CH<sub>4</sub> veriminin %23,59'dan %43,22'ye yükseldiği belirtilmiştir (Y. Yang, T. Li, ve diğ., 2022).

Çöp gazının (*deponi gas-landfill gas*) kullanılabilirliğinin ve ekonomik tahminlerinin yapılmasına ihtiyaç vardır. Bouyakhass ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, Fas Rabat'taki Oum Azza çöp depolama alanındaki atıklardan biyogaz üretilmesini ve daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülmesini ekonomik modeller ile incelemişlerdir. Çalışmanın başlangıcında şehrin nüfus artışına göre olacak şekilde atık miktarı tahmini yapılmıştır. Ardından bu atıkların kullanımı sonucu üretilecek CH<sub>4</sub> miktarı da tahmin edilmiştir. Tahminler gerçekleştirilirken LandGem ve çok fazlı (*multiphase models*) modeller kullanılmıştır. 2028 yılında olmak üzere, LandGem modeline

göre üretilecek maksimum CH<sub>4</sub> miktarı 64,30 milyon m<sup>3</sup> ve çok fazlı modeller için de 88,18 milyon m<sup>3</sup> gaz olarak ifade edilmiştir. Yine 2028 yılında olmak üzere çok fazlı model tahminine göre CH<sub>4</sub>'dan elektrik üretiminin 182,97 GWh'a ulaşabileceği raporlanmıştır. Yürütülen çalışmada çöp gazından elektrik üretimi için gerekli olan sistemin ekonomik analizi de gerçekleştirilmiştir. Ekonomik analiz sonucunda Toplam Yaşam Döngüsü Maliyeti (*Total Life Cycle Cost*) 59,04 milyon USD olarak bulunmuştur. Bu değer, kWh başına 0,05 USD maliyete dayalı olarak ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra, çalışmanın net bugünkü değerinin (*net present value*) pozitif ve geri ödeme süresi (*payback period*) 11,45 yıla kadar çıktığı raporlanmıştır. Çalışma sonucunda yazarlar, projenin hayata geçmesi ile birlikte küresel CH<sub>4</sub> emisyonunun %79,1'ini bu projenin önleyeceğini belirtmişlerdir. Son değerlendirme olarak, yapılan çalışmanın iklim değişikliği önlemlerine katkı sağlaması açısından son derece önemli bir noktada olduğu ifade edilmiştir (Bouyakhssas ve diğ., 2023).

Çöp depolama alanlarından gerçekleşen çöp sularının (sızıntılarının) da toplanması ve biyogaz tesisleri gibi CH<sub>4</sub> üretim tesislerine geri döndürülmesi, şehirlerdeki atıkların yönetimi ve CH<sub>4</sub> gazı üretim verimliliği açısından önemlidir. Tabi ki çöp sızıntı sularının toplanması ve tesislerde kullanımı için tesis projeleri ve parametrik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda Khan ve diğ. (2024) yaptıkları çalışmada, çöp sızıntı suyunun geri döndürülmesi ve hendek ısı modellerinin birleştirilmesi için parametrik sonuçlar sunmuşlardır. Çöplük modeli oluştururken tesisin ısı ve CH<sub>4</sub> üretme potansiyeli incelenmiştir. Atık parçacık boyutu, atık eklenmesi, inorganik madde içeriği, sızıntı suyu geri dönüşüm oranı ve çöplüğün yaşı oluşturulan modele parametre olarak tanımlanmıştır. Model, merkezi bileşik dönen tasarım (*CCRD- central composite rotating design*) kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma

sonucunda, sızıntı suların çöplüklere geri döndürüldüğü sistemlerde 2,2 kat daha fazla enerji üretildiği belirlenmiştir. Sızıntı suların sisteme sağladığı enerji transferi kışın 2,3 GJ, yazın ise 1,5 GJ'dür. Parametrik olarak, partikül çapı D10, atık ekleme 52,32 Ktoe, inorganik içeriği %2, sızın suyu geri dönüş hızı 300 l/gün ve çöplük yaşı 4,07 yıl olduğunda sistemin optimum girdileri olabileceği raporlanmıştır. Yazarlar, sürdürülebilir çöplük modellerinin daha fazla parametre girdisine ve CH<sub>4</sub> üretimini maksimize edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamıştır (Khan ve diğ., 2024).

### **3. CH<sub>4</sub> SAFLAŞTIRMA TEKNOLOJİLERİ**

Günümüzde CH<sub>4</sub> tutma ve saflaştırma teknolojileri, yüksek konsantrasyonlu CH<sub>4</sub> içeren akımlardan olan doğal gaz saflaştırmada özellikle konvansiyonel CO<sub>2</sub> tutma ve N<sub>2</sub> ayırma sistemleri ile verimli şekilde işletilmektedir. Ancak, antropojenik kaynaklardan atmosfere salınan CH<sub>4</sub>'ın tutulması için sınırlamalar oldukça zordur. Lackner (2020) çalışmasında, antpojenik CH<sub>4</sub>'ın tutulmasının iki zorlu yanını bu emisyon akımlarının hayli seyreltik olması ve doğal prosesler ile elde edilememesi olarak belirtmiştir (Lackner, 2020). Bunun yanında, CH<sub>4</sub>'ın atmosferdeki konsantrasyonunun çok seyreltik olması ekonomik açıdan da büyük bir sorundur. Kütle bazında bakıldığında, CH<sub>4</sub> şu anda dünya atmosferinde CO<sub>2</sub>'ten 600 kat daha fazla seyreltik durumdayken sanayi öncesi zamanlarda 1000 kat daha fazla seyreltikti. Carbon Engineering'in öngördüğü havadan doğrudan CO<sub>2</sub> tutma sistemi için elektrikli fanların enerji ihtiyacı 220 MJ olarak ifade edilmiştir (Keith, Holmes, Angelo, & Heidel, 2018). Belirtilen fanların 80 Pa'lık düşük basınçta çalışırken %74,5 yüksek toplam verime sahip olduğu belirtilmiştir. Yinede, çalışmada belirtildiği üzere Sherwood Kuralı'na bağlı olarak havadaki konsantrasyon azaldıkça daha

çok filtrasyon gerekecek ve maliyetler artacaktır (Sherwood Kuralı, ayırma işlemlerinde akımda konsantrasyon düştükçe maliyetin de orantılı olarak artacağını ifade etmektedir.) Havadaki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu düştükçe 220 MJ enerji üretmek için gerekli maliyete ek maliyetin oluşacağı raporlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında CH<sub>4</sub> emisyonlarının atmosferden doğrudan tutulması hem sistemleri zorlaştıracığından hem de maliyeti artıracığından, doğal hava akışlarından yararlanılması Lackner 2020'in çalışmasında desteklenmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmalarda düşük konsantrasyonlu CH<sub>4</sub> akımlarının atmosferden doğrudan tutulması yerine kaynağında tutulmasının daha işletilebilir ve çevreci bir yaklaşım olacağı belirtilmiştir (Abd, Othman, Shamsudin, Helwani, & Idris, 2023; Neishabori Salehi ve diğ., 2018; Weh, Xiao, Ashraful Islam, & May, 2020).

CH<sub>4</sub> içeren akımların saflaştırılmasında günümüzde çeşitli ayırma prosesleri kullanılmaktadır. Ayırma proseslerinin özellikleri gaz akımı özellikleri, işletme şartları, gaz bileşimine vb. bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Karbon tutma sistemleri geleneksel yöntemlerde CO<sub>2</sub> tutma ile temelde doğal gaz saflaştırma için kriyojenik damıtma, amin absorpsiyonu, membran sistemleri ve adsorpsiyon süreçlerini içermektedir. N<sub>2</sub>'un CH<sub>4</sub>'dan ayrılması, %4 veya daha az N<sub>2</sub> içeriği gerektiren yanıcı olmayan maddeler için, boru hattı özelliklerini karşılamak adına gereklidir ve bu saflaştırma genellikle çok pahalı bir süreç olan kriyojenik damıtma ile gerçekleştirilir. Kriyojenik damıtma, fiziksel bir proses olup gaz karışımındaki CO<sub>2</sub> ve/veya N<sub>2</sub>'nin (doğal gaz, biyogaz, bacagazı zenginleştirmede istenen ürüne göre) sıkıştırılıp soğutularak fazının değiştirilmesine dayanmaktadır. Fazı değişen bileşen, karışım gazından ayrılmaktadır. Ayrımı istenen bileşenin fazlarının geçişine göre işlemler farklılaşabilir. Örneğin CO<sub>2</sub> ayrımında faz değişimi için gaz-sıvı (*liquefaction separation*) ve gaz-katı (*sublimation separation*) faz değişimleri gerçekleştirilmektedir. Faz değişimi

için temelde karışım içindeki CO<sub>2</sub> konsantrasyonu dikkate alınmaktadır. Gaz karışımı içinde CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yüksek olduğunda genellikle gaz-sıvı değişimi tercih edilirken, düşük konsantrasyonlarda ise gaz-katı etkileşimi kullanılmaktadır (Berstad, Neksa, & Anantharaman, 2012). Gaz-sıvı faz değişimleri için konvansiyonel olarak en iyi bilinen ve işletilen süreç Ryan-Holmes prosesidir (Holmes & Ryan, 1982). Gaz-katı faz değişimlerinde ise Clodic ve diğ. (2005) yılında kırılganlaşma ve çözünme yöntemlerine dayanan proseslerini literatüre sunmuşlardır (Clodic, Hitti, Younes, Bill, & Casier, 2005). Bu süreçler haricinde birleşik faz değişim (*combined phase change*) sistemleri de (*CryoCell Process*) literatürde çalışılmaktadır (Hart & Gnanendran, 2009). Kriyojenik damıtmanın dezavantajı enerji yoğun sistemler olmasıdır. Kriyojenik şartlar çok yüksek basınçlar ve çok düşük işletme sıcaklıklarına ihtiyaç duyar (80bar, -170°C). Bu durumda, sıkıştırma ve çok düşük sıcaklıklara ulaşmada ek soğutma sistemlerinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Maqsood, Mullick, Ali, Kargupta, & Ganguly, 2014). Kriyojenik damıtma sistemlerindeki soğuk sıkıştırma sırasındaki enerjinin, doğal gaz sıvılaştırma sürecinde kullanılması ile yan ürün olarak CO<sub>2</sub> üretimi yapılabileceği Bi ve Ju (2022) çalışmasında avantaj olarak belirtilmiştir. Bu iki sistemin entegrasyonu ile gelişmiş petrol geri kazanımının da (*enhanced oil recovery-EOR*) destekleneceği ifade edilmiştir (Bi & Ju, 2022).

Geleneksel bir diğer CO<sub>2</sub> tutma ve CH<sub>4</sub>'dan ayırma süreci, absorpsiyon prosesleridir. Bu proseslerde absorpsiyonun gerçekleştirildiği sıvı faz fiziksel ve kimyasal çözücülerdir. Fiziksel absorpsiyon süreçlerinde CO<sub>2</sub>, çözücü ile zayıf van der Waals bağı ile bağlanır. Bu süreçte, CO<sub>2</sub>'in çözücü içindeki çözünürlüğü ve Henry Yasası'na göre basınç ve sıcaklıkla olan ilişkisi önemlidir. Gaz karışımı içindeki CO<sub>2</sub>'in kısmi basıncı arttıkça çözücüdeki çözünürlüğü artarken, sıcaklıkla tam tersi

davranış göstermektedir. Bu durum fiziksel absorpsiyon süreçlerinin yüksek basınçta ve çok düşük sıcaklıklarda çalışmasını zorunlu kılar. Dolayısıyla, yüksek işletme maliyetleri kaçınılmazdır (N.Borhani & Wang, 2019). Günümüzde bilinen fiziksel çözücüler ile işletilen konvansiyonel absorpsiyon süreçleri Rectisol, Selexol, Fluor ve Purisol'dür. Bu süreçlerde kullanılan fiziksel çözücüler sırası ile metanol, polietilen glikol dimetil eter, propilen karbonat ve n-metil-2-prolidon'dur. Öte yandan, kimyasal absorpsiyon süreçlerindeki çözücüler ile CO<sub>2</sub> kimyasal reaksiyona girerek tutulmaktadır. Genellikle CO<sub>2</sub>, karbamat ve bikarbonat oluşturacak şekilde reaksiyona girer ki bu durum kullanılan kimyasal çözücünün CO<sub>2</sub> tutma hızı ve kapasitesini artırır, daha seçici hale gelmesine neden olur. Kimyasal çözücülerin bir diğer avantajı da ppm seviyesindeki CO<sub>2</sub>'i yakalayabilmeleridir (Soo ve diğ., 2024). Konvansiyonel sistemlerde tercih edilen kimyasal çözücüler monoetanolamin (MEA), dietanolamin (DEA), di-isopropanol amin (DIPA) ve metil dietanolamindir (MDEA) (Wu ve diğ., 2020). En yaygın kullanılan diğer kimyasal çözücüler diğer amin grupları, iyonik sıvılar (*ionic liquids-ILs*) ve nanoakışkanlardır (F. Liu ve diğ., 2019; Rahimi, Riahi, & Abbasi, 2020; Zeng ve diğ., 2017). Ancak, kimyasal çözücülerin özellikle amin gruplarının pek çok dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan en başta çözücülerin rejenerasyonu için yüksek sıcaklıklar gereklidir ki maliyeti artıran en önemli etmenlerden biridir. Ayrıca, ekipmanların korozyonu, yüksek sıcaklıkta çözücülerin bozulması, amin çözeltilerinin oksidasyonu ve uçuculuk sebebiyle çözelti kayıpları amin absorpsiyon proseslerinde olumsuzluklara neden olmaktadır (Koçyiğit Çapoğlu, Uysal, & Doğan, 2024). Absorpsiyon proseslerinde karbon tutma sistemleri için uygun çözücülerin seçimi, rejenerasyonda enerji ihtiyacının en aza indirilmesi için literatürde farklı karışımların ve çözücü türlerinin araştırmaları hızla devam etmektedir (Vinjarapu ve diğ., 2024). Soo ve diğ. (2024) CO<sub>2</sub> absorpsiyonu için yayımladıkları derleme çalışmada,

karbon tutma sistemlerinde absorpsiyon süreçlerinin veriminin artırılması için, çözücü seçimi-geliştirilmesinden sonra çalışma şartlarının ayarlanması, absorpsiyon kolon tasarımı ve gaz-sıvı temas yüzeyinin artırılması gibi işletmeyi etkileyecek parametrelerin de tartışılması gerekliliğini araştırmacılara vurgulamıştır (Soo ve diğ., 2024).

Membran ayırma süreci, karışık gazların bir membran aracılığıyla geçişinde farklı difüzyon hızlarından yararlanan bir tekniktir. Bu prensip, belirli karakteristik gazların membranı seçici olarak geçmesine olanak tanır, böylece arıtma ve ayırma hedeflerine ulaşmak mümkün olur (Baker, 2004). Boru hatları içerisinde, gaz ayırma membranları, karışık gaz akışlarından belirli gazları zenginleştirmek için bir geçiş katmanı olarak işlev görmektedir (Singh, Prasad, & Ahn, 2024). Bu nedenle, bu membranların yüksek geçirgenlik ve seçicilik sergilemesi, özellikle CH<sub>4</sub> ile N<sub>2</sub> gibi karakteristik gazlar için kritik öneme sahiptir. Petrol ve gaz endüstrisinde, polimer bazlı membranlar düşük üretim maliyetleri, köklü endüstriyel uygulama koşulları ve mükemmel performansları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (Y. Xu, Goh, Wang, & Bae, 2019; Yagizatli, Ulas, Sahin, & Ar, 2024). Son yıllarda, polimer bazlı gaz ayırma membranlarının kullanımı önemli ölçüde artmış ve bu durum, inorganik membranların kullanımını geride bırakmıştır (Warsinger ve diğ., 2018). Bu tercihin arkasında, polimer membranların yüksek kullanım oranları ve kolay kurulum özellikleri yatmaktadır (Osman ve diğ., 2024). CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub> gazlarının benzer moleküler çapları (CH<sub>4</sub> için 3.8 Å ve N<sub>2</sub> için 3.64 Å) ve karşılaştırılabilir polariteleri, geleneksel polimer membranlarda etkili bir CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> ayırımı sağlamakta zorluklar yaratmaktadır (Chang ve diğ., 2022). Bununla birlikte, zeolit veya metal-organik çerçeveler (*metal organic frameworks-MOFs*) gibi ince film teknolojileri kullanılarak yapılan ayırım işlemleri, daha yüksek seçicilik ve geçirgenlik sunmaktadır (Wei ve diğ., 2024).

Doğal gaz taşıma boru hatlarındaki gaz ayırma tespit yöntemleri bu membranlara dayandığından,  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  ayırma membranlarının olağanüstü gaz ayırma özelliklerine ve mekanik dayanıklılığa sahip olması gerekmektedir (Reza & Amir, 2010). Bu gereklilik, boru hattı ortamlarının karmaşıklığı ve zorlu koşulları nedeniyle daha da önem kazanmaktadır (Imtiaz ve diğ., 2022). Membran sistemlerinde ise ayırma işlemi gaz molekülünün fiziksel ve kimyasal yapısına son derece bağlı olduğundan malzeme seçimi, karakterizasyonunu hassas ve maliyeti yüksek duruma getirmektedir. Membran malzemesi gaz karışımındaki bileşenlere göre ayarlanamıyorsa prosesin optimum koşullar altında çalıştırılması performansını iyileştirememektedir (Abd ve diğ., 2023).

Adsorpsiyon ile ayırma, gaz ya da sıvı karışımı içindeki belirli bir bileşenin ayrımı için akımın gözenekli ve seçici katı bir adsorbent ile temas ettirilmesi işlemidir. Adsorpsiyon prosesi, fiziksel ve kimyasal olarak iki şekilde gerçekleşebilmektedir. Fiziksel adsorpsiyon, gaz molekülünün adsorbent denilen katı yüzeye tutunması ile van-der Waals kuvvetleri, uzun vadede London kuvvetleri ve kısa vadede ise moleküller arası itme ile meydana gelir. Bu proseste kimyasal bir reaksiyon yoktur ve tersinir bir işlemdir. Sıcaklık arttıkça kapasite azalmaktadır. Kimyasal adsorpsiyon ise tersinir olmayan bir işlemdir. Daha kuvvetli kimyasal bağlar vardır. Aktivasyon enerjisi gerekir. Sıcaklık arttıkça kapasite artmaktadır. Adsorpsiyon prosesinde yüksek yüzey alanına sahip olduklarından adsorbent olarak adlandırılan gözenekli malzemeler kullanılmaktadır. Adsorpsiyon (katı yüzeye tutunma), adsorbentin gözeneklerindeki spesifik iç yüzey alanında gerçekleşmektedir (Muryanto, Firyanto, & Nurkholik, 2019). Adsorpsiyondan yararlanarak ayırma ise farklı moleküler ağırlık, şekil, moleküllerin polaritesi (kutuplaşma), dipol ve kuadripol momentleri nedeniyle gerçekleşmektedir. Bazı moleküller,

diğerlerine göre partikül yüzeyine daha güçlü tutunurlar ya da gözenekler bu molekülleri geçirmek için çok küçüktür (McCabe, 2005). PSA sistemleri (*Pressure Swing Adsorption*), gaz saflaştırma uygulamaları için yaygın olarak kullanılan döngüsel adsorpsiyon ayırma sistemlerinden biridir. PSA/PVSA sistemleri, 2 temel aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşama, katı adsorbentün üzerine doygunluk hâline gelene kadar adsorbat gazın adsorplanmasıdır. İkinci aşama ise, adsorplanan bileşenin desorplanması/salınması ve bir sonraki döngü için hazırlanmasıdır. PSA sistemlerinde döngüsel (çevrim) bir akım bulunduğundan çok çeşitli parametrik koşula bağlı tasarım ve işletme şartlarını beraberinde getirmektedir. PSA çevrimlerinde optimizasyonu gereken ve adsorpsiyonla ayırma verimini etkileyen parametreler: kolon sayısı, çevrim adımı, çevrim süresi, adsorpsiyon/desorpsiyon basıncı, akış hızı, besleme akımı konsantrasyonu ve enerji gereksinimidir (Bahrun, Bono, Othman, & Zaini, 2022; Kamin, Bahrun, & Bono, 2022). Günümüzde PSA sistemlerinin aktif kullanıldığı alanlar havadan O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> ayrılması, doğal gaz saflaştırılması, O<sub>2</sub>/Ar saflaştırma, H<sub>2</sub> saflaştırılması, baca gazı temizlenmesi, kriyojenik hava ayırma ünitesi için atmosferik havanın ön saflaştırılmasıdır (Ackley, Rege, & Saxena, 2003). Geleneksel sistemlere (absorpsiyon ve kriyojenik damıtma) göre adsorpsiyon sistemleri düşük enerji tüketimi, yüksek verimlilik, çevre dostu olma ve basitlik gibi avantajlara sahiptir (Abd ve diğ., 2023; Neishabori Salehi ve diğ., 2018). Adsorpsiyon prosesleri büyük ölçüde saflaştırma işlemine özel olarak uygun adsorbentlerin geliştirilmesine dayanır. PSA sisteminin verimli çalışabilmesi, yüksek adsorpsiyon kapasiteli ve seçiciliği olan bir adsorbentün kullanımına son derece bağlıdır (Gong ve diğ., 2018; Hu ve diğ., 2021; Moradi ve diğ., 2021; Qian, Yang, Li, Wang, & Rodrigues, 2021). Adsorbentler, PSA sistemlerinin ana bileşenlerinden biridir. CH<sub>4</sub> akımından CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> ayrımı için birçok malzeme sınıfı önerilmiş ve adsorpsiyon kapasiteleri test edilmiştir. Aktif karbonlar, zeolitler, metal

organik ağyapılar (MOFs), silika jel ve karbon moleküler elekler (*carbon molecular sieve-CMS*) önerilen ve literatürde araştırmaları devam eden malzemelerden birkaçıdır (Aguilar-Armenta, Patiño-Iglesias, & Leyva-Ramos, 2003; García-Pérez ve diğ., 2007; Hu ve diğ., 2021; Karimi & Fatemi, 2021; L. Li, Yang, Li, Chen, & Li, 2014; B. Liu & Smit, 2010; Qian ve diğ., 2021; Rufford ve diğ., 2013). Javani ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada CH<sub>4</sub> gazının 24 farklı adsorbent üzerindeki kapasitelerini 1 bar ve çeşitli çalışma sıcaklıklarındaki koşullarda derleyerek literatüre değerli bir kaynak olarak sunmuştur (Javani ve diğ., 2021).

#### **4. KÖMÜR YATAĞI METANININ SAFLAŞTIRILMASI İÇİN YÜRÜTÜLEN ÇALIŞMALAR**

Kömür yatağı metanı, kömür yüzeyine adsorbe edilmiş ve gözeneklerinde kısmen serbest halde bulunan, geleneksel olmayan gaz yakıt kaynağı olarak tanımlanmıştır. ABD, Rusya ve Çin en önemli kömür yatağı metanına sahip ülkelerdir ve dünya genelindeki rezervler 74 ülke arasında dağılmıştır. Kanıtlanmış jeolojik kömür yatağı metanı rezervi yaklaşık  $5,44 \times 10^{11} \text{ m}^3$  olarak raporlanmıştır (Qiu ve diğ., 2024). İçeriğinde yüksek orandaki CH<sub>4</sub> gazı, bu akımı önemli bir enerji kaynağı hâline de getirmektedir. Çünkü, kömür ve petrol ürünlerine kıyasla yakıldığında birim enerji başına daha az CO<sub>2</sub> salımı yapması, daha temiz bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesine ve üretimi için CH<sub>4</sub> içeren kaynakların ulusal enerji stratejilerinde ön plana çıkmasına neden olmuştur (Weh, Xiao, Ashraful Islam, ve diğ., 2020). Günümüzde enerjiye olan talebin arzı karşılamakta zorluk çekmesi, alternatif ve yerli enerji kaynağı arayışları ile insan faaliyetleri sonucu artan karbon emisyonları ülkelerin enerji güvenliği ve karbon tutma hedefleri açısından çeşitli

tutma/saflaştırma senaryoları belirlemelerine yol açmıştır. Bu nedenle, kömür yatağı metanının içerdiği CO<sub>2</sub> tutularak karbon tutma hedefine yönelik bir adım atılırken diğer yandan da CH<sub>4</sub>'ın saflaştırılması sağlanarak yerli/ulusal bir enerji kaynağının kazanımı literatürdeki çalışmalar ile hızla devam etmektedir (A. Xu ve diğ., 2023).

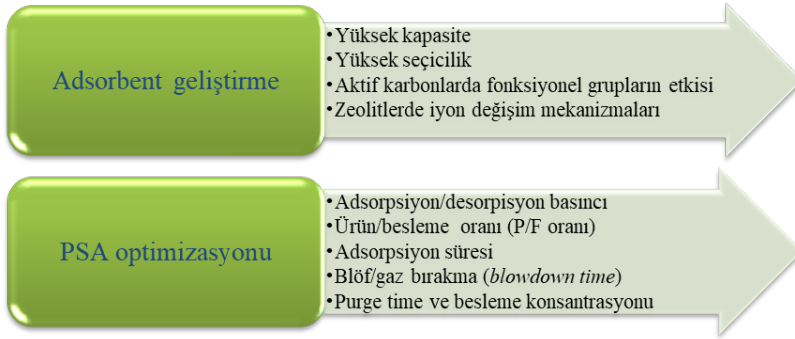
CH<sub>4</sub> emisyon kaynaklarında, özellikle kömür yatağı metanı, gerçekleşen düşük ve orta konsantrasyonlu emisyon akımlarının PSA sistemlerinde tutulması ve elde edilen yüksek saflıktaki CH<sub>4</sub>'ın değerlendirilmesi literatür çalışmalarını PSA sistemlerine adsorbent geliştirme ve PSA optimizasyonuna yöneltmiş durumdadır.

PSA sistemleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda öne çıkan konular derlendiğinde literatürde ihtiyaç duyulan boşluklar:

- CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> içeren gaz karışımlarının saflaştırılması için, yüksek denge kapasiteli ve seçicilikte adsorbentlerin belirlenmesi
- Farklı adsorbentlerin geniş adsorpsiyon çalışma sıcaklık ve basınç aralıklarındaki izotermelerinin çıkarılması
- CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> moleküler özelliklerine ve adsorbent yüzey özelliklerine bağlı olarak, kinetik ve denge adsorpsiyon davranışlarının belirlenmesi
- PSA sistemlerinde, CH<sub>4</sub> içeren ürün akımının saflığı, üretilebilirliği ve geri kazanımı üzerinde besleme akımındaki konsantrasyonun etkisi
- Besleme akımının CH<sub>4</sub> konsantrasyonuna göre pompa işi ve gerekli enerjinin belirlenerek tutma/saflaştırma işleminin ekonomik ve çevresel açıdan değerlendirilmesidir.

Şekil 3'te PSA sistemlerinin parametrik olarak optimizasyon gerektiren noktaları ile adsorbent geliştirme çalışmalarındaki boşluklar sunulmuştur.

**Şekil 3. Adsorbent Geliştirme ve PSA Sistemleri İçin Literatürdeki İhtiyaçlar**



Guo ve diğ. (2016) çalışmalarında Coal Science& Technology Resarch Institute'te karbon moleküler elek hazırlayarak dört kolonlu bir PSA sisteminde kömür yatağı metanını tutmak için kullanmışlardır. Kömür yatağı besleme konsantrasyonu %25 olarak belirtilmiştir. Çalışmada proses parametrelerinin adsorpsiyona etkileri PSA sisteminde incelenmiştir. Adsorpsiyon basıncı, adsorpsiyon süresi ve konsantrasyon proses parametreleri olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, optimum proses koşulları altında akımdaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun %62,8'e yükseltilebileceğini göstermiştir. 2018 yılında yaptıkları çalışmada ise Xinjing Madeni'nde düşük konsantrasyonlu kömür yatağı metanının ekstrasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Maden içinde sıkıştırılmış doğal gaz üretim projesini hayata geçirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen metanca zengin akımın kalorifik değeri 33,47 MJ/m<sup>3</sup> olarak raporlanmıştır. PSA sisteminden elde edilen ürün konsantrasyonunun ise %88 ile %95 arasında değişkenlik gösterebildiği ancak sistem kontrolünün oldukça esnek olabildiği belirtilmiştir (Guo ve diğ., 2016).

CH<sub>4</sub> içeren akımlardan N<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> ayrımı oldukça zorlu bir süreçtir. Çünkü her iki gaz molekülü birbirine yakın kinetik moleküler çapa sahiptir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için seçiciliği ve kapasitesi yüksek adsorbentlerin geliştirilmesi de CH<sub>4</sub> saflaştırma ve zenginleştirmenin önemli ihtiyaçlarından biridir. Bu amaçla, Weh ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada %85 CH<sub>4</sub> ve %15 N<sub>2</sub> içeren akımı saflaştırmak için N<sub>2</sub> seçici Engelhard titanosilikat tip-4 (ETS-4) adsorbentin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Adsorbentin performansı DR- PSA sisteminde denenmiştir. PSA kolonları optimizasyonu iki farklı amaçla yapılmıştır. Öncelikle ürün akımındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun boru hatlarında istenen konsantrasyona ulaşması (>93 mol %CH<sub>4</sub>) için deneysel olarak çalışılmıştır. Daha sonrasında ise yasal çevre düzenleme sınırı için (>99 mol %N<sub>2</sub>) kolon döngüleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, ETS-4'ün DR-PSA kolonunda kullanımı ürün akımı içindeki CH<sub>4</sub>'ın yüksek geri kazanım ile boru hattı standartlarına rahat şekilde ulaşılmasını sağlamıştır. Ancak, ürün akımı konsantrasyonu çevre düzenleme sınırına ulaşamamıştır. Bu nedenle, CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> ayrımlarında N<sub>2</sub> ayrımı için seçiciliği daha yüksek adsorbentlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir (Weh, Xiao, Islam, & May, 2020).

Yapılan bir başka çalışmada yine konvansiyonel olmayan CH<sub>4</sub> kaynağından CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub> ayrımının yapılabilmesi için adsorbent denemesi gerçekleştirilmiştir. Qian ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada çoklu kolon (*multicolumn*) VPSA sisteminde CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> ayrımını hareketli yatak modelinde (*simulated moving bed-SMB*) modellemişlerdir. Model çalışmalarında hindistancevizi kabuğundan elde edilmiş aktif karbonu adsorbent olarak kullanmışlardır. Çoklu kolon sisteminde çalışma 1 kolondan 8 kolona kadar genişletilmiştir. Besleme akımı konsantrasyonu %10 ile %50 arasında değiştirilmiştir. Temel olarak sonuçlar, hindistancevizi kabuğundan elde edilmiş aktif

karbonun kolonda kullanılması ile %10'luk CH<sub>4</sub> içeren besleme akımının %99,0 oranında saflaştırılabildiğini göstermiştir. Proses açısından değerlendirme yapıldığında, kolonlarda gerçekleştirilen geri akımların CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun %20'nin altında olması durumunda ürün ve besleme akımlarımdaki CH<sub>4</sub> oranının artması demektir. Bu durumun VPSA sisteminin performansını düşürebileceği ve dolayısıyla döngüler sırasında enerji tüketimini artırabileceği vurgulanmıştır. Bu sorunu aşmak için çalışmada, %10 CH<sub>4</sub> içeren besleme akımı önce geleneksel VPSA kolonundan geçirilmiş ve konsantrasyonu %25,3'e çıkarılmıştır. Ardından, bu akım besleme akımı olarak kabul edilip SMB modunda simüle ederek %99,0 CH<sub>4</sub> içeren ürün akımı olarak zenginleştirilebileceği görülmüştür. Yazarlar bu çalışma ile, doğrudan yüksek saflıkta CH<sub>4</sub> içeren ürün gazının üretilebileceğini ifade etmişlerdir (Qian, Zhou, Yang, & Li, 2023).

Hu ve diğ. (2021) yapmış olduğu çalışmada, ticari bir aktif karbon kullanımı ile düşük konsantrasyonlu kömür madeni gazından CH<sub>4</sub> tutulması çalışılmıştır. Bu amaçla, 4 kolondan oluşan bir VPSA sistemi kullanılmıştır. Yüksek saflık oranı ve ürün geri kazanımı için PVSA döngüsü incelenmiş ve işletme parametrelerinin etkisi duyarlılık (*sensitivity analysis*) analizi ile araştırılmıştır. Ayrıca, sistemin enerji tüketimi de hesaplanmıştır. Kolon veriminin maksimum olması, ürün geri kazanımı ve saflığının da maksimum olması için adsorpsiyon süresi ve vakum basıncının önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. %5 CH<sub>4</sub> içeren kaynaktan %40 CH<sub>4</sub> içeren ürün akımı elde etmek, 2 adet VPSA sistemini birbirine bağlayarak teknik olarak uygulanabilir. Sera gazı etkileri göz önüne alındığında işletilebilirliğin mümkün olduğu belirtilmiştir (Hu ve diğ., 2021).

Karimi ve Fatemi'nin çalışmasında, %20 CH<sub>4</sub> içeren N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> karışımı akımından N<sub>2</sub> saflaştırılması ve CH<sub>4</sub> tutulması bir PSA sisteminde deneysel olarak araştırılmış ve modelleme

çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon izotermeleri ve kütle transfer sınırlamaları deneysel olarak elde edilmiştir. Adsorbent olarak Norit RB1 aktif karbon ile çalışılmıştır. Çalışmalar yüksek basınç bölgesinde gerçekleştirilmiştir (20 bar). Adsorpsiyon izotermeleri ve denge adsorpsiyon kapasiteleri, 25°C’de 1-10 bar aralığı için N<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazları için hacimsel metotla belirlenmiştir. Aktif karbon üzerine N<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> adsorplanmasının tek tabaka olarak gerçekleştiği belirtilmiştir. Aktif karbon üzerinde CH<sub>4</sub> tutulmasının moleküler kutuplaşmaya göre CH<sub>4</sub> için daha fazla olduğu açıklanmıştır. Toplam kütle transfer direncinin 3 farklı direnç olan film, makrogözenek ve mikrogözenek difüzyon dirençlerinden oluştuğu belirtilmiştir (Karimi & Fatemi, 2021).

Kömür yatağı tutma çalışmalarının bir başkası Çin’de Huayang New Material Technology Group Co. Ltd tarafından bir kömür maden sahasında gerçekleştirilmiştir. Konsantrasyonu %16-%30 rasında değişen kömür yatağı metan akımları VPSA (*Vacuum Pressure Swing Adsorption*) sisteminden geçirilmiştir. Çalışmada, kömür yatağı metanı besleme akımı konsantrasyonu, adsorpsiyon basıncı ve gaz akış hızının saflaştırma süreci üzerindeki etkisi prametrik olarak araştırılmıştır. VPSA sistemi ile kömür yatağı metan akımından tutularak zenginleştirilen ürün gazının konsantrasyonu %16-30’dan %43,3-70,7’ye yükselmiştir. Bu değerlerin Çin’deki şehir gazı değerlerinin karşılamada başarılı olduğu raporlanmıştır. CH<sub>4</sub> üretilebilirliği ise  $43,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg.h}$  olarak elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmada VPSA kolonları içinde kullanılmak üzere TUTJ-1 süperhidrofobik zeoliti kullanılmıştır. Belirtilen zeolitin suya karşı diğer zeolitlerden daha dirençli olduğu da çalışmanın önemli sonuçları arasında raporlanmıştır (Shang, Bai, Li, Li, & Yang, 2022).

Bae ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, kömür yatağı metanının zenginleştirilmesi ve bu sırada elde edilen ürün gazının patlama riskinin de ortadan kaldırılması için vakum ve sıcaklık

parametreleri ile vakum, sıcaklık ve vakum salınımlı adsorpsiyon (*Vacuum-Temperature-Vacuum Swing Adsorption-VTVSA*) süreci uygulanmıştır. Kolonlarda adsorbent olarak bal peteği şeklinde monolitik karbon fiber kompozitler kullanılmıştır. Çalışmada ilk aşamada sadece vakum etkisi ile zenginleştirilen kömür yatağı metanı ürün konsantrasyonu %3-8,6'dan %18,2-50,7'ye yükseltilmiştir. Bu konsantrasyon değerlerinin CH<sub>4</sub>'ın hava ile karışımlarında patlayıcı özellik göstermeyeceği dolayısıyla çalışma sırasındaki güvenlik sorununun vakum salınımlı sistem yardımıyla çözüldüğü belirtilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, CH<sub>4</sub> akımını daha da zenginleştirebilmek ve süreç sırasındaki enerji tüketimini de en aza indirebilmek amacıyla bir adet VSA (*Vacuum Swing Adsorption*) ardından bir adet VTVSA kolonu bağlanmıştır. Bu kombinasyon ile besleme akımları sırası ile %3,1 ve %4,1 CH<sub>4</sub> içerirken kolonlarda adsorpsiyon sonrası ürün konsantrasyonları %31,6 ve %37,3'e yükselmiştir. Sonuç olarak yazarlar, kömür yatağı metanından faydalanması adına adsorpsiyona dayalı sistemlerin avantajlarını ortaya koymuşlardır. Ayrıca, kullanılan adsorpsiyon kolonlarının çöp (deponi) gazının saflaştırılması ve metanca zengin ürün gazının eldesi için de kullanılabilir olduğu belirtilmiştir (Bae, Yu, & Su, 2022).

Hu ve diğ. (2023), CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub> gazlarının ayrımı için PSA sisteminde deneysel olarak çalışıp ayrıca sistem için modelleme çalışması da gerçekleştirmişlerdir. Hem deneysel olarak hem de model çalışması içinde PSA döngüsünün optimizasyonu için besleme akımı özellikleri, döngü süresi ve desorpsiyon basıncının etkilerini PSA kolonunda araştırmışlardır. Ayrıca, kolon döngülerine ağır ürün geri dönüş ve boşaltma adımı (*heavy product reflux/purge step*) eklendiğinde CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> ayrımı için etkisinin belirlenmesi de çalışmanın bir diğer amacı olarak sunulmuştur. Kolonlarda adsorbent olarak iyonik sıvı zeolitler (ILZs) kullanılmıştır. Deneyler pilot sistemde gerçekleştirilmiştir.

Deneyssel olarak ağır boşaltma adımının kullanılması ile, besleme akımındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu %5,6 ve %25,1 olduğunda adsorpsiyon sonrasında konsantrasyonlar sırası ile %27,4 ve %85,5'e yükselmiştir. Ancak, kolonda geri döngü (*reflux*) %74'ten %80'e çıkınca, CH<sub>4</sub> geri kazanımı (*recovery*) %79'dan %75'e düşmüştür. Bu düşüşün nedeni olarak, akım içindeki CH<sub>4</sub>'ın hafif ürün tarafına karışarak kaybedildiği belirtilmiştir (Hu ve diğ., 2023).

Guo ve diğ. (2024) çalışmalarında, kömür yatağı metan akımlarının saflaştırılması sırasındaki patlama risklerini ortadan kaldırmayı amaçlayan bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada DR-VPsA (*dual-reflux vacuum*) kolonlarına gönderilecek besleme akımında oksijenin varlığını dikkate almışlar ve besleme konsantrasyonunu %20 CH<sub>4</sub>, %16 O<sub>2</sub> ve %64 N<sub>2</sub> gazı içerecek şekilde üçlü gaz karışımı olarak kolona beslemişlerdir. Konsantrasyon açısından bakıldığında çalışmanın iki ana hedefini, düşük CH<sub>4</sub> konsantrasyonlu akımı taşımacılık gerekliliğini sağlaması adına %30'un üzerine çıkarmak ve kolondan ayrılan atık gazın konsantrasyonunu da %2,5 ve altına indirmek olarak belirlemişlerdir. Adsorpsiyon sonucunda elde edilen ürün gazı içindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu %69,7'ye yükselmiştir. Çalışmada adsorbent olarak iyonik sıvı ile muamele edilmiş zeolit (*ILZ*) kullanılmıştır. Ayrıca, kolonlarda iç ve dış döngüler sırasında detaylı güvenlik analizleri de CH<sub>4</sub>'ın patlama sınırlarını gösteren üçlü karışım diagramı kullanılarak gerekli sıcaklık ve basınç koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar çalışma sonucunda adsorpsiyon sistemlerini, kömür ocaklarında CH<sub>4</sub> yakalamayı daha güvenli hale getirebilecek hem çevresel hem de enerji açısından avantaja sahip teknolojiler olarak değerlendirmişlerdir (Y. Guo ve diğ., 2024).

## 5. SONUÇ

Antropojenik emisyon kaynaklardan  $\text{CH}_4$  gazının tutulması, günümüz araştırmalarının hızla gelişen alanlarından biridir. Özellikle küresel enerji ihtiyacının da artması ile ülkelerin ulusal kaynaklarına yönelmesi, yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesi adına, antropojenik kaynaklardaki  $\text{CH}_4$ 'ın tutulması ve uygulanabilir şekilde zenginleştirilmesi mühendislik alanında gelişen teknolojiler yardımıyla ilerlemektedir. Yüksek konsantrasyonlu ve düşük konsantrasyonlu  $\text{CH}_4$  akımlarının öncelikli olarak adsorpsiyon sistemlerinde tutulup zenginleştirilerek ısı ve enerji olarak kullanıma sunulması da  $\text{CH}_4$  akımlarını, ülkelerin ulusal-yerli enerji kaynaklarından biri haline getirmektedir. Kömür madenleri açısından zengin ülkeler günümüz çalışmalarında kömür yatağı metan akımına oldukça önem vermekte ve ülkelerinin ulusal enerji kaynağı haline getirebilmek için özellikle PSA sistemleri ile bu akımları zenginleştirmeye çalışmaktadır. PSA sistemlerinin diğer konvansiyonel sistemlere göre daha ucuz, basit ve işletilebilir olması ve ayrıca, çok çeşitli adsorbent kullanımının da mümkün olması kömür yatağı metanının saflaştırılmasında kayda değer bir araştırma alanı sunmaktadır. Yapılan bu çalışma sayesinde, kömür yatağı metanının değerlendirilmesine, PSA sistemlerini işletme şartlarının, tasarımlarının ve yüksek seçicilikte ve kapasitedeki adsorbentlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKÇA

- Abd, A. A., Othman, M. R., Shamsudin, I. K., Helwani, Z., & Idris, I. (2023). Biogas upgrading to natural gas pipeline quality using pressure swing adsorption for CO<sub>2</sub> separation over UiO-66: Experimental and dynamic modelling assessment. *Chemical Engineering Journal*, 453, 139774. doi:https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139774
- Ackley, M. W., Rege, S. U., & Saxena, H. (2003). Application of natural zeolites in the purification and separation of gases. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61(1-3), 25-42. doi:https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00353-6
- Aguilar-Armenta, G., Patiño-Iglesias, M. E., & Leyva-Ramos, R. (2003). Adsorption Kinetic Behaviour of Pure CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in Natural Clinoptilolite at Different Temperatures. *Adsorption Science & Technology*, 21(1), 81-91. doi:https://doi.org/10.1260/02636170360699831
- Aleshina, S., Delgado-Antequera, L., & Gemar, G. (2024). Assessing the economic implications of carbon emissions on climate change: Estimating the impact using methane-adjusted DICE model. *Structural Change and Economic Dynamics*, 71, 35-44. doi:https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.06.001
- Aşıcı, A. A., & Acar, S. (2022). Channels Of Cooperation Between The EU And Turkey On Green Transformation. [AB ve Türkiye Arasında Yeşil Dönüşüm için İşbirliği Kanalları]. *Ankara Avrupa Çalışmaları Dergisi*, 21(1), 43-67. doi:https://doi.org/10.32450/aacd.1148598
- Aydın, G., Karakurt, İ., & Aydın, K. (2011). ANTROPOJENİK METAN EMİSYONLARININ SEKTÖREL ANALİZİ.

- TÜBAV Bilim Dergisi*, 4(1), 42-51. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/tubav/issue/21522/230935>
- Bacaksız, O. K., & Azman, M. A. (2022). Tanenler: Silajlarda ve Hayvan Besleme Uygulamalarında Kullanımı. *Balıkesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, 11, 64-73. doi:<https://doi.org/10.53424/balikesirsbd.1150298>
- Bae, J.-S., Yu, X. X., & Su, S. (2022). Enrichment of Low-Quality Methane by Various Combinations of Vacuum and Temperature Swing Adsorption Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(38), 14298-14304. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01890>
- Bahrin, M. H. V., Bono, A., Othman, N., & Zaini, M. A. A. (2022). Carbon dioxide removal from biogas through pressure swing adsorption – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 285-306. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.012>
- Baker, R. (2004). Membrane Technology And Applications. *Metallurgical Transactions A*, 6. doi:<https://doi.org/10.1002/0470020393>
- Berstad, D., Nekså, P., & Anantharaman, R. (2012). Low-temperature CO<sub>2</sub> Removal from Natural Gas. *Energy Procedia*, 26, 41-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.008>
- Bi, Y., & Ju, Y. (2022). Review on cryogenic technologies for CO<sub>2</sub> removal from natural gas. *Frontiers in Energy*, 16(5), 793-811. doi:<https://doi.org/10.1007/s11708-022-0821-0>
- Bouyakhssas, R., Souabi, S., Bouaouda, S., Taleb, A., Kurniawan, T. A., Liang, X., . . . Anouzla, A. (2023). Adding value to unused landfill gas for renewable energy on-site at Oum Azza landfill (Morocco): Environmental

- feasibility and cost-effectiveness. *Trends in Food Science & Technology*, 142, 104168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104168>
- Chang, M., Wang, F., Wei, Y., Yang, Q., Wang, J.-X., Liu, D., & Chen, J. (2022). Separation of CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> by an ultra-stable metal–organic framework with the highest breakthrough selectivity. *AIChE Journal*, 68. doi:<https://doi.org/10.1002/aic.17794>
- Chen, L., Ma, M., & Xiang, X. (2023). Decarbonizing or illusion? How carbon emissions of commercial building operations change worldwide. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104654. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104654>
- Chovancová, J., Zambrano-Monserrate, M. A., Bergougui, B., Ahakwa, I., & Dam, M. M. (2024). Global determinants of methane emissions in OECD countries: A dynamic panel approach. *Research in Globalization*, 9, 100232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resglo.2024.100232>
- Clodic, D., Hitti, R., Younes, M., Bill, A., & Casier, F. (2005). CO<sub>2</sub> capture by anti-sublimation Thermo-economic process evaluation. *Fourth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration*.
- DailyCO<sub>2</sub>. Recent Daily Average CO<sub>2</sub> at Mauna Loa. Retrived from [https://www.co2.earth/daily-co2#:~:text=419.88%20ppm&text=Units%20%3D%20parts%20per%20million%20\(ppm\).](https://www.co2.earth/daily-co2#:~:text=419.88%20ppm&text=Units%20%3D%20parts%20per%20million%20(ppm).)
- García-Pérez, E., Parra, J. B., Ania, C. O., García-Sánchez, A., van Baten, J. M., Krishna, R., . . . Calero, S. (2007). A computational study of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> adsorption in zeolites. *Adsorption*, 13(5), 469-476. doi:<https://doi.org/10.1007/s10450-007-9039-z>

- Gong, H., Chen, Z., Yu, H., Wu, W., Wang, W., Pang, H., & Du, M. (2018). Methane recovery in a combined amine absorption and gas steam boiler as a self-provided system for biogas upgrading. *Energy*, 157, 744-751. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.004>
- Grinham, A., Albert, S., Deering, N., Dunbabin, M., Bastviken, D., Sherman, B., . . . Evans, C. D. (2018). The importance of small artificial water bodies as sources of methane emissions in Queensland, Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(10), 5281-5298. doi:<https://doi.org/10.5194/hess-22-5281-2018>
- Guo, H., Li, X., Che, Y., Liu, C., Zhang, J., & Wang, P. (2016). Experimental study of low concentration coalbed methane by pressure swing adsorption. *Clean Coal Technology*, 22, 132-136.
- Guo, Y., Hu, G., Liu, L., Wang, J., Webley, P. A., & Li, G. K. (2024). Upgrading low-concentration oxygen-bearing coal bed methane by dual-reflux vacuum swing adsorption. *Adsorption*, 30(6), 1479-1491. doi:<https://doi.org/10.1007/s10450-024-00513-3>
- Guo, Z., Chen, T., Li, X., Liu, K., Zhang, X., Zhang, G., . . . Wang, S. (2024). Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for partial oxidation reforming of low concentration coal bed methane and its application on SOFC. *Fuel*, 378, 132857. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132857>
- Hart, A., & Gnanendran, N. (2009). Cryogenic CO<sub>2</sub> capture in natural gas. *Energy Procedia*, 1(1), 697-706. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.092>
- Holmes, A. S., & Ryan, J. M. (1982). U. Patent.
- Hu, G., Guo, Y., Zhao, Q., Xiao, G., Li, K. G., & May, E. F. (2023). Separation of Methane and Nitrogen Using Heavy

- Reflux Pressure Swing Adsorption: Experiments and Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(18), 7114-7126.  
doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00094>
- Hu, G., Zhao, Q., Manning, M., Chen, L., Yu, L., May, E. F., & Li, K. G. (2022). Pilot scale assessment of methane capture from low concentration sources to town gas specification by pressure vacuum swing adsorption (PVSA). *Chemical Engineering Journal*, 427, 130810.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130810>
- Hu, G., Zhao, Q., Tao, L., Xiao, P., Webley, P. A., & Li, K. G. (2021). Enrichment of low grade CH<sub>4</sub> from N<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> mixtures using vacuum swing adsorption with activated carbon. *Chemical Engineering Science*, 229, 116152.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.116152>
- IEA. (2022). Global methane tracker 2022. *IEA Publications*.  
Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>
- IEA. (2024). Global methane emissions from oil and gas.  
Retrieved from <https://www.iea.org/articles/global-methane-emissions-from-oil-and-gas>
- Imtiaz, A., Othman, M. H., Jilani, A., Khan, I. U., Kamaludin, R., Iqbal, J., & Al-Sehemi, A. G. (2022). Challenges, Opportunities and Future Directions of Membrane Technology for Natural Gas Purification: A Critical Review. *Membranes*, 12(7).  
doi:<https://doi.org/10.3390/membranes12070646>
- IPCC. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. *Agenda*, 6(07), 333.

- İTÜ. (2023). Moleküler Geometri. Retrived from <https://web.itu.edu.tr/ozcanm/kim/molekuler%20geometri.pdf>
- Jackson, R. B., Saunois, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., . . . Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, 15(7), 071002. doi:<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
- Javani, R., Maghsoudi, H., Darvishi Gilan, S., & Majidpour, M. (2021). Study on adsorption performance of different adsorbents in nitrogen/methane separation. *Separation Science and Technology*, 56(15), 2562-2577. doi:<https://doi.org/10.1080/01496395.2020.1842889>
- JMO. (2024). Çöp Depolama- Çöp Depolama Alanlarında Oluşan Gazın (Deponi Gazı) Çevresel Etkileri ve Ekonomik Potansiyeli. Retrived from [https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/c2cd764c0de1f1f\\_ek.pdf](https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/c2cd764c0de1f1f_ek.pdf)
- Kamin, Z., Bahrin, M. H. V., & Bono, A. (2022). A short review on pressure swing adsorption (PSA) technology for nitrogen generation from air. *AIP Conference Proceedings*, 2610(1), 050006. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0099702>
- Karimi, K., & Fatemi, S. (2021). Methane capture and nitrogen purification from a nitrogen rich reservoir by pressure swing adsorption; experimental and simulation study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106210>
- Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S., & Heidel, K. (2018). A process for capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere. *Joule*,

- 2(8), 1573-1594.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Khan, O., Parvez, M., Yahya, Z., Alhodaib, A., Yadav, A. K., Hoang, A. T., & Ağbulut, Ü. (2024). Waste-to-energy power plants: Multi-objective analysis and optimization of landfill heat and methane gas by recirculation of leachate. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 957-968.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.04.022>
- Kim, J., Maiti, A., Lin, L, Stolaroff, J, K, Smit, B, Aines, R, D. (2013). New Materials for Methane Capture From Dilute and Medium-concentration Sources. *Nature Communications*, 1-7.  
doi:<https://doi.org/10.1038/ncomms2697>
- Koçyiğit Çapoğlu, İ., Uysal, D., & Doğan, Ö. M. (2024). Mass Transfer studies for CO<sub>2</sub> absorption into carbitol acetate as an effective physical absorbent using a laboratory-scale packed column. *Heat and Mass Transfer*, 60(1), 133-145.  
doi:<https://doi.org/10.1007/s00231-023-03427-y>
- Kumari, S., Fagodiya, R., Hiloidhari, M., Dahiya, R., & Kumar, A. (2020). Methane production and estimation from livestock husbandry: A mechanistic understanding and emerging mitigation options. *Science of the Total Environment*, 709, 136135.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136135>
- Lackner, K. S. (2020). Practical constraints on atmospheric methane removal. *Nature Sustainability*, 3(5), 357-357.  
doi:<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0496-7>
- Li, H., Zheng, C., Lu, J., Tian, L., Lu, Y., Ye, Q., . . . Zhu, X. (2019). Drying kinetics of coal under microwave irradiation based on a coupled electromagnetic, heat

- transfer and multiphase porous media model. *Fuel*, 256, 115966. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115966>
- Li, L., Yang, J., Li, J., Chen, Y., & Li, J. (2014). Separation of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> and CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> mixtures by M/DOBDC: A detailed dynamic comparison with MIL-100(Cr) and activated carbon. *Microporous and Mesoporous Materials*, 198, 236-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.07.041>
- Liu, B., & Smit, B. (2010). Molecular Simulation Studies of Separation of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, and CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> by ZIFs. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(18), 8515-8522. doi:<https://doi.org/10.1021/jp101531m>
- Liu, F., Fang, M., Dong, W., Wang, T., Xia, Z., Wang, Q., & Luo, Z. (2019). Carbon dioxide absorption in aqueous alkanolamine blends for biphasic solvents screening and evaluation. *Applied Energy*, 233-234, 468-477. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.007>
- Malerba, M. E., Lindenmayer, D. B., Scheele, B. C., Waryszak, P., Yilmaz, I. N., Schuster, L., & Macreadie, P. I. (2022). Fencing farm dams to exclude livestock halves methane emissions and improves water quality. *Global Change Biology*, 28(15), 4701-4712. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.16237>
- Manheim, D. C., Yeşiller, N., Hanson, J. L., & Blake, D. R. (2024). Climate impacts of landfill gas emissions: Analysis for 20-year and 100-year time horizons. *Waste Management*, 186, 318-330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.06.015>
- Maqsood, K., Mullick, A., Ali, A., Kargupta, K., & Ganguly, S. (2014). Cryogenic carbon dioxide separation from natural gas: a review based on conventional and novel emerging

- technologies. 30(5), 453-477.  
doi:<https://doi.org/10.1515/revce-2014-0009>
- McCabe, W., L., Smith, J., C., Harriot, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7. ed.). Singapore: McGraw Hill.
- Moradi, H., Azizpour, H., Bahmanyar, H., Rezamandi, N., & Zahedi, P. (2021). Effect of Si/Al Ratio in the Faujasite Structure on Adsorption of Methane and Nitrogen: A Molecular Dynamics Study. *Chemical Engineering & Technology*, 44(7), 1221-1226.  
doi:<https://doi.org/10.1002/ceat.202000356>
- Muryanto, S., Firyanto, R., & Nurkholik. (2019). Adsorption of cadmium using teak leaves powder (*Tectona grandis* sp.): embedding Mahaffy's tetrahedral concept in undergraduate chemical engineering capstone lab project. *Journal of Physics: Conference Series*, 1307(1), 012007.  
doi:<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1307/1/012007>
- N.Borhani, T., & Wang, M. (2019). Role of solvents in CO<sub>2</sub> capture processes: The review of selection and design methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109299.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109299>
- Neishabori Salehi, R., Sharifnia, S., & Rahimpour, F. (2018). Natural gas upgrading by selective separation on zeotype adsorbents. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 54, 37-46.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.03.008>
- Odebiri, O., Archbold, J., Glen, J., Macreadie, P. I., & Malerba, M. E. (2024). Excluding livestock access to farm dams reduces methane emissions and boosts water quality.

- Science of the Total Environment*, 951, 175420.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175420>
- Oğul, B. (2023). İklim Değişikliği Tarım Sektörünü Nasıl Etkiliyor? Türkiye Ekonomisi Üzerine Ekonometrik Bir Uygulama. [How Does Climate Change Affect the Agriculture Sector? An Econometric Analysis on the Turkish Economy]. *Tarım Ekonomisi Dergisi*, 28(2), 151-162. doi:<https://doi.org/10.24181/tarekoder.1113741>
- Oğuz, G. (2024). *Impact of abiotic and biotic factors on GHG emissions from rural ponds in Ankara*. Middle East Technical University,
- Ollivier, Q. R., Maher, D. T., Pitfield, C., & Macreadie, P. I. (2019). Punching above their weight: Large release of greenhouse gases from small agricultural dams. *Global Change Biology*, 25(2), 721-732. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.14477>
- Osman, A. I., Chen, Z., Elgarahy, A. M., Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Priya, A. K., . . . Yap, P.-S. (2024). Membrane Technology for Energy Saving: Principles, Techniques, Applications, Challenges, and Prospects. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 5(5), 2400011. doi:<https://doi.org/10.1002/aesr.202400011>
- Özdemir, M., Pehlivan, S., & Melikoğlu, M. (2024). Estimation of greenhouse gas emissions using linear and logarithmic models: A scenario-based approach for Türkiye's 2030 vision. *Energy Nexus*, 13, 100264. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100264>
- Özerdem, F. (2024). İklim Krizinin Gölgesi Altında Avrupa Yeşil Mutabakatı Ve Türkiye'yi Bekleyen Zorluklar *Akademi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(31), 51-65. doi:<https://doi.org/10.34189/asbd.11.31.004>

- Öztan, H., Çapoğlu, İ. K., Uysal, D., & Doğan, Ö. M. (2023). A parametric study to optimize the temperature of hazelnut and walnut shell gasification for hydrogen and methane production. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101581. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101581>
- Öztürk, H. H. (2024). *Tarımsal Üretimde Sera Gazı Emisyonları ve Karbon Ayak İzi Yönetimi: Akademisyen Kitabevi*.
- Peacock, M., Audet, J., Bastviken, D., Cook, S., Evans, C. D., Grinham, A., . . . Futter, M. N. (2021). Small artificial waterbodies are widespread and persistent emitters of methane and carbon dioxide. *Global Change Biology*, 27(20), 5109-5123. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.15762>
- Pospíšil, J., Charvát, P., Arsenyeva, O., Klimeš, L., Špiláček, M., & Klemeš, J. J. (2019). Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.027>
- Qian, Z., Yang, Y., Li, P., Wang, J., & Rodrigues, A. E. (2021). An improved vacuum pressure swing adsorption process with the simulated moving bed operation mode for CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> separation to produce high-purity methane. *Chemical Engineering Journal*, 419, 129657. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129657>
- Qian, Z., Zhou, Y., Yang, Y., & Li, P. (2023). Methane recovery from low-grade unconventional natural gas by the integrated mode of the conventional/improved vacuum pressure swing adsorption processes. *Fuel*, 331, 125717. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125717>

- Qiu, L., Wang, S., Hu, B., Yan, J., Deng, S., Shen, J., . . . Chen, B. (2024). A review on high-value development and utilization of unconventional methane-containing gaseous fuel resources. *Energy Conversion and Management*, 319, 118980.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118980>
- Rahimi, K., Riahi, S., & Abbasi, M. (2020). Effect of host fluid and hydrophilicity of multi-walled carbon nanotubes on stability and CO<sub>2</sub> absorption of amine-based and water-based nanofluids. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103580.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103580>
- Reza, A., & Amir, N. (2010). Application of membrane in gas separation processes: Its suitability and mechanisms. *Petroleum and Coal*, 52.
- Rufford, T. E., Watson, G. C. Y., Saleman, T. L., Hofman, P. S., Jensen, N. K., & May, E. F. (2013). Adsorption Equilibria and Kinetics of Methane + Nitrogen Mixtures on the Activated Carbon Norit RB3. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(39), 14270-14281.  
doi:<https://doi.org/10.1021/ie401831u>
- Sauniois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., . . . Patra, P. K. (2019). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data Discussions*, 2019, 1-136.  
doi:<https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Shang, H., Bai, H., Li, X., Li, J., & Yang, J. (2022). Site trials of methane capture from low-concentration coalbed methane drainage wells using a mobile skid-mounted vacuum pressure swing adsorption system. *Separation and Purification Technology*, 295, 121271.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121271>

- Singh, R., Prasad, B., & Ahn, Y.-H. (2024). Recent developments in gas separation membranes enhancing the performance of oxygen and nitrogen separation: A comprehensive review. *Gas Science and Engineering*, 123, 205256. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205256>
- Solomon, T., Gupta, V., & Ncho, C. M. (2023). Balancing livestock environmental footprints with forestry-based solutions: a review. *Ecologies*, 4(4), 714-730. doi:<https://doi.org/10.3390/ecologies4040047>
- Soo, X. Y. D., Lee, J. J. C., Wu, W.-Y., Tao, L., Wang, C., Zhu, Q., & Bu, J. (2024). Advancements in CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 81, 102727. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>
- Sun, S., Ma, L., & Li, Z. (2021). Methane Emission Estimation of Oil and Gas Sector: A Review of Measurement Technologies, Data Analysis Methods and Uncertainty Estimation. *Sustainability*, 13(24). doi:<https://doi.org/10.3390/su132413895>
- Temel, Ö. F. (2024). *Yeşil Finans, Ekonomik Büyüme, Yenilenebilir Enerji Tüketimi ve Doğrudan Yabancı Yatırımların Ekolojik Ayak İzi Üzerindeki Etkileri: E-7 Grubu Örneği*. (Yüksek Lisans). Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Tıraş, H. H. (2024). Tarım İlaçlarının Sera Gazı Emisyonlarına Etkisi: BRICS Ülkeleri Örneği. [Effect of Pesticides on Greenhouse Gas Emissions: BRICS Countries Example]. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 11(1), 130-139. doi:<https://doi.org/10.30910/turkjans.1404529>
- Turetsky, M. R., Abbott, B. W., Jones, M. C., Walter Anthony, K., Olefeldt, D., Schuur, E. A., . . . Kuhry, P. (2019).

Permafrost collapse is accelerating carbon release. In: Nature Publishing Group.

Uysal, D., Öztan, H., Gafur, A., A., , & Doğan, Ö., M. (2022). Himmetoğlu Ve Seyitömer Bitümlü Şeyleri Ile Plastik Şehir Atıklarının Kabarcıklı Akışkan Yataklı Reaktörde Gazlaştırılması. *Journal of Thermal Science and Technology* 42(2), 257-268. doi:<https://doi.org/10.47480/isibted.1195027>

Veysikarani, D., & Akdağ, N. (2024). Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler İle Yeşil Gelecek Ve Refah Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Dumlupınar University Journal of Social Science*(79), 207-221. doi:<https://doi.org/10.51290/dpusbe.1385528>

Vinjarapu, S. H. B., Neerup, R., Larsen, A. H., Jørsboe, J. K., Villadsen, S. N. B., Jensen, S., . . . Fosbøl, P. L. (2024). Results from pilot-scale CO<sub>2</sub> capture testing using 30 wt% MEA at a Waste-to-Energy facility: Optimisation through parametric analysis. *Applied Energy*, 355, 122193. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122193>

Wang, H., Shen, J., Gao, J., Wang, W., Zhu, L., Gu, Y., & Wang, T. (2024). Cost Estimation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gas Emissions Reduction- A Bottom-Up Analysis of Coal-bed Methane Extraction and Utilization in Shanxi, China. *Energy*, 133007. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133007>

Wang, X., Wei, K., Yan, S., Wu, Y., Kang, J., Feng, P., . . . Ling, Y. (2020). Efficient and stable conversion of oxygen-bearing low-concentration coal mine methane by the electrochemical catalysis of SOFC anode: From pollutant to clean energy. *Applied Catalysis B: Environmental*, 268,

118413.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.118413>

Warsinger, D., Chakraborty, S., Tow, E., Plumlee, M., Bellona, C., Loutatidou, S., . . . Lienhard, J. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004>

Weh, R., Xiao, G., Ashraful Islam, M., & May, E. F. (2020). Upgrading sub-quality natural gas by dual reflux-pressure swing adsorption using activated carbon and ionic liquid zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 392, 123753. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123753>

Weh, R., Xiao, G., Islam, M. A., & May, E. F. (2020). Nitrogen Rejection by Dual Reflux Pressure Swing Adsorption Using Engelhard Titanosilicate Type 4. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(52), 22573-22581. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c03768>

Wei, M., Tang, X., Wang, Y., Bai, X., Wang, X., Wang, X., . . . Yang, J. (2024). Significant improvement in CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> selectivity achieved through ammonium exchange in mordenite. *Separation and Purification Technology*, 340, 126799. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126799>

Wermac. (2023). Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors. Retrieved from Internet:[http://www.wermac.org/safety/safety\\_what\\_is\\_l\\_el\\_and\\_uel.html](http://www.wermac.org/safety/safety_what_is_l_el_and_uel.html)

Wu, Y., Xu, J., Mumford, K., Stevens, G. W., Fei, W., & Wang, Y. (2020). Recent advances in carbon dioxide capture and utilization with amines and ionic liquids. *Green Chemical*

*Engineering*, 1(1), 16-32.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.gce.2020.09.005>

Xiong, J., Yang, J., Chi, X., Wu, K., Song, L., Li, T., . . . Ye, D. (2021). Pd-Promoted Co<sub>2</sub>NiO<sub>4</sub> with lattice CoONi and interfacial PdO activation for highly efficient methane oxidation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 292, 120201.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120201>

Xu, A., Yang, L., Huang, W., Zhang, Y., Long, H., Liu, Z., . . . Yang, S. (2023). Exergy, economic, exergoeconomic and environmental (4E) analyses and multi-objective optimization of a PEMFC system for coalbed methane recovery. *Energy Conversion and Management*, 297, 117734.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117734>

Xu, P., Liao, Y., Zheng, Y., Zhao, C., Zhang, X., Zheng, Z., & Luan, S. (2019). Northward shift of historical methane emission hotspots from the livestock sector in China and assessment of potential mitigation options. *Agricultural and Forest Meteorology*, 272-273, 1-11.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.022>

Xu, Y., Goh, K., Wang, R., & Bae, T.-H. (2019). A review on polymer-based membranes for gas-liquid membrane contacting processes: Current challenges and future direction. *Separation and Purification Technology*, 229, 115791.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115791>

Yagizatli, Y., Ulas, B., Sahin, A., & Ar, I. (2024). Preparation and Characterization of SPEEK–PVA Blend Membrane Additives with Colloidal Silica for Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal of Polymers and the*

*Environment*. doi:<https://doi.org/10.1007/s10924-024-03263-z>

Yang, Y., Li, T., Feng, P., Wang, X., Wang, S., Ling, Y., & Shao, Z. (2022). Highly efficient conversion of oxygen-bearing low concentration coal-bed methane into power via solid oxide fuel cell integrated with an activated catalyst-modified anode microchannel. *Applied Energy*, 328, 120134.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120134>

Yang, Y., Liu, Y., Chen, Z., Li, M., Rao, M., Wang, X., . . . Ling, Y. (2022). Enhanced conversion efficiency and coking resistance of solid oxide fuel cells with vertical-microchannel anode fueled in CO<sub>2</sub> assisted low-concentration coal-bed methane. *Separation and Purification Technology*, 288, 120665. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120665>

Yang, Z., Hussain, M. Z., Marín, P., Jia, Q., Wang, N., Ordóñez, S., . . . Xia, Y. (2022). Enrichment of low concentration methane: an overview of ventilation air methane. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(12), 6397-6413. doi:<https://doi.org/10.1039/D1TA08804A>

Yörük, Ö., Uysal, D., & Doğan, Ö. M. (2025). Carbon-assisted hydrogen production via electrolysis at intermediate temperatures: Impact of mineral composition, functional groups, and membrane effects on current density. *Fuel*, 380, 133268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133268>

Zeng, S., Zhang, X., Bai, L., Zhang, X., Wang, H., Wang, J., . . . Zhang, S. (2017). Ionic-Liquid-Based CO<sub>2</sub> Capture Systems: Structure, Interaction and Process. *Chemical Reviews*, 117(14), 9625-9673. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00072>

- Zhang, D., He, H., Ren, Y., Haider, R., Urynowicz, M., Fallgren, P. H., . . . Sabar, M. A. (2022). A mini review on biotransformation of coal to methane by enhancement of chemical pretreatment. *Fuel*, 308, 121961. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121961>
- Zhang, L., Tian, H., Shi, H., Pan, S., Chang, J., Dangal, S. R., . . . Canadell, J. G. (2022). A 130-year global inventory of methane emissions from livestock: Trends, patterns, and drivers. *Global Change Biology*, 28(17), 5142-5158. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.16280>
- Zou, C., Ma, M., Zhou, N., Feng, W., You, K., & Zhang, S. (2023). Toward carbon free by 2060: A decarbonization roadmap of operational residential buildings in China. *Energy*, 277, 127689. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127689>

# KİMYA MÜHENDİSLİĞİ

**yaz**  
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com