

Yeşil Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik Perspektifiyle Biyogaz Üretiminde Alternatif Enerji Kaynakları

Mesut Yaşar¹ 

Burak Güngörmüş 

*Sorumlu Yazar: yasarmesut10@gmail.com

burak.gungormus@varaka.com

Varaka Kağıt Sanayi A.Ş. Paşaköy Mahallesi, 49500 Cadde No:66 Balıkesir, Türkiye

<https://orcid.org/0009-0006-7951-7839>

Geliş Tarihi: 11.02.2025 / Kabul Tarihi: 21.05..2025

Özet

Biyogaz, organik atıkların anaerobik ortamda mikroorganizmalar aracılığıyla metan gazına dönüştürülmesiyle elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, karbon ayak izinin azaltılması, çevrenin korunması, dışa bağımlılığın azaltılması ve istihdam yaratılması gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Artan nüfus ve sanayileşme, enerji talebini artırarak mevcut kaynakların sınırlılığı ve dengesiz dağılımı gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunların aşılabilmesi için geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı rezervlere sahip olması ve iklim değişikliğine yol açarak gezegenimizin dengesini bozması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmeli; ayrıca, kaynakların kısıtlı olması nedeniyle ortaya çıkan atıkların hammadde olarak değerlendirilmesi sağlanmalıdır. Biyokütle, her bölgede bulunabilen bir kaynak olup, dışa bağımlılığı azaltarak enerji ve katma değerli ürün üretimine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, yerel istihdamı desteklemekte, kırsal kalkınmayı teşvik etmekte ve çevresel koşulların iyileştirilmesine katkıda bulunarak yaşam kalitesini artırmaktadır. Biyogaz tesislerinin temel amacı atıkların bertaraf edilmesi olup, elde edilen biyogazın elektrik üretiminde kullanılmasıyla işletmelerin kârlılığı artırılmaktadır. Ayrıca, organik atıklardan biyogaz üretimi, katı ve sıvı gübre üretimini de içermektedir. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen materyaller, biyogaz üretimini daha sürdürülebilir ve verimli hale getirmekte; altyapı ve teknolojik gelişmeler ile süreçlerin daha çevre dostu olması sağlanmaktadır. Yeşil dönüşüm süreçlerinin biyogaz üretimi üzerindeki olumlu etkileri, bu alandaki araştırmaların önemini artırmıştır. Bu çalışmada, alternatif materyallerin biyogaz üretimine katkıları ele alınmış ve bu materyallerin gelecekteki kullanımına yönelik öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık, biyogaz, proses, sürdürülebilirlik

Alternative Energy Sources in Biogas Production from the Perspective of Green Transformation and Sustainability

Mesut Yaşar¹ 

Burak Güngörmüş 

*Corresponding Author: yasarmesut10@gmail.com

burak.gungormus@varaka.com

Varaka Kağıt Sanayi A.Ş. Paşaköy Mahallesi, 49500 Cadde No:66 Balıkesir, Türkiye

<https://orcid.org/0009-0006-7951-7839>

Arrival Date: 11.02.2025 / Accepted Date: 21.05.2025

Abstract

Biogas is a renewable energy source that is obtained through the conversion of organic waste into methane gas by microorganisms in an anaerobic environment. Various advantages are offered by renewable energy sources, including the reduction of carbon footprint, environmental protection, the decrease in external dependency, and job creation. The increasing population and industrialization have led to a rise in energy demand, resulting in issues such as the limited availability and uneven distribution of existing resources. To overcome these challenges, the use of renewable energy sources should be encouraged due to the finite reserves of traditional

*Sorumlu Yazar

energy sources and their contribution to climate change, which disrupts the balance of the planet. Additionally, the reuse of waste as raw material should be ensured due to resource limitations. Biomass is a resource that can be found in every region and contributes to energy production and the development of value-added products while reducing external dependency. Furthermore, local employment is supported, rural development is promoted, and environmental conditions are improved, thereby enhancing the quality of life. The primary purpose of biogas plants is the disposal of waste, while the biogas obtained is utilized for electricity generation, increasing the profitability of businesses. Moreover, the production of biogas from organic waste also includes the generation of solid and liquid fertilizers. Materials derived from renewable sources enhance the sustainability and efficiency of biogas production, while advancements in infrastructure and technology contribute to making processes more environmentally friendly. The positive effects of green transformation processes on biogas production have increased the significance of research in this field. In this study, the contributions of alternative materials to biogas production have been examined, and recommendations regarding their future utilization have been provided.

Keywords: Waste, biogas, process, sustainability

1. Giriş

Yenilenebilir enerjiler, enerji güvenliğini artırma, ithalatı azaltma ve sera gazı emisyonlarını düşürme açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. (Lopez vd., 2024). Yenilenebilir enerjilerden olan biyogaz, çeşitli organik atıkların biyokimyasal reaksiyonlarla parçalanması yoluyla metan (CH₄) ve CO₂ gibi gazların üretilmesini içerir (Demirbaş ve Yıldız, 2021). Başka bir ifadeyle, organik hammaddelelerden üretilen yenilenebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Saflaştırıldığında doğal-gaza alternatif olarak kullanılabilir, fosil yakıt bağımlılığını azaltır ve karbon emisyonlarını düşürür. Ayrıca, üretim sürecinde oluşan yan ürünler tarımda gübre olarak değerlendirilebilir, böylece döngüsel ekonomi desteklenir. Artan enerji ihtiyacı ve çevresel sorunlar göz önüne alındığında, biyogazın kullanım alanlarının genişletilmesi ve teknolojik gelişiminin hızlandırılması gerekmektedir (Ojolo ve ark., 2007). Fosil yakıtlar yenilenemez ve aşırı kullanımları, tükenmeye ve sürdürülemez enerji bağımlılığına yol açar. Bunların yanması, sera gazları salarak küresel ısınma ve çevresel bozulmaya sebep olur (Hossain vd., 2025). Sürdürülebilirlik ve yeşil dönüşüm perspektifinden bakıldığında ise, biyogaz üretimi çevresel etkilerin azaltılmasına önemli bir katkı sağlar. Farklı organik kaynaklardan elde edilen bi-

yogaz, atık yönetimi, enerji üretimi ve çevre koruma gibi avantajlar sunar. Bu süreç, fosil yakıtların kullanımını azaltarak karbon ayak izini düşürürken, atıkların verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Dünya nüfusunun artışıyla birlikte enerji tüketimi de hızla yükselmektedir. Fosil yakıtların tükenebilir olması, gelecekte enerji arzında ciddi sorunlara yol açabilecek olup, kaynakların aşırı kullanımı ise iklim değişikliğini daha da belirgin hale getirmektedir. Bu durum, hem insan yaşamını hem de doğal dengeyi olumsuz etkileyerek, sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Sözer ve ark., 2016). Son yıllarda, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma amacıyla biyogaz üretimi, sürdürülebilir enerji stratejilerinin önemli bir parçası olarak kabul edilmektedir. Biyogaz kavramı, toplumların yaşam standartlarını ve refah seviyelerini belirleyen temel bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Üretim süreçlerindeki kullanımından evlerde kullanımına, ulaşımdan sağlık ve güvenlik konularına kadar birçok alanda kendine yer bulmaktadır. İş yapabilme yeteneği olarak bilinen enerji kavramı, farklı yapılarda olabilir ve çeşitli yöntemlerle farklı kavramlara dönüştürülebilir. Bu tür enerji çeşitleri; mekanik, ısı, elektrik, kimyasal ve nükleer enerji olarak gruplandırılabilir (Demir, 2024). Enerji, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler gibi konularda da önemli

bir role sahiptir. Fosil yakıtlardan kaynaklanan sorunlar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelinerek, enerji verimliliği artırma ve karbon azaltma çalışmaları yapılarak enerji kullanımının daha sürdürülebilir hale getirilmesini hedeflemektedir. Toplumların enerji kullanımını dengeli ve etkili bir şekilde yönetmeleri, refah seviyelerini yükseltmeleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel enerji kaynaklarına alternatif olarak önem kazanan, yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi, gel-git enerjisi, okyanus ısı enerjisi, hidrojen enerjisi, biyokütle ve biyogaz enerjisidir (Çanka Kılıç, 2011).

Bilimsel araştırmalar, dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olduğunu ve mevcut tüketim hızıyla birlikte bu rezervlerin belirli bir süre içinde tükenme olasılığının yüksek olduğunu göstermektedir. Fosil yakıt türleri ve yaklaşık tükenme süreleri ise şu şekilde verilmiştir:

- **Petrol:** Petrol rezervleri, mevcut tüketim hızıyla değerlendirildiğinde yaklaşık 45-50 yıl gibi bir süre içinde tükenme eğilimindedir. Petrol, enerji sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir, bu nedenle alternatif enerji kaynaklarına yönelme önemlidir (IEA, 2023).
- **Doğal gaz:** Doğal gaz rezervleri, bugünkü tüketim hızıyla değerlendirildiğinde yaklaşık 65-70 yıl kadar bir süre içinde tükenme eğilimindedir. Doğal gaz, enerji üretiminde ve endüstriyel kullanımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (BP, 2023).
- **Kömür:** Kömür rezervleri, mevcut tüketim hızına göre değerlendirildiğinde yaklaşık 150-160 yıl gibi bir süre içinde tükenme eğilimindedir. Ancak, kömürün çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak görülmemekte ve yerine yenilenebilir enerji kaynakları öne çıkmaktadır. Fosil yakıt türlerinde karşımıza çıkan bu durum, enerji üretimi için alternatif ve sürdürülebilir kaynaklara olan ihtiyacı artırmaktadır (IEA, 2023).

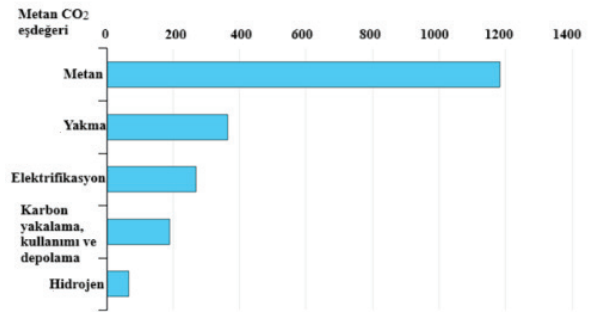
Metan gazı, tarım, sulak alanlar, hayvansal atıklar, kömür madenleri ve petrol-doğal gaz sektörleri gibi çeşitli kaynaklardan salınmaktadır. Küresel emisyonların üçte biri doğal sulak alanlardan, dörtte biri tarımsal faaliyetlerden (özellikle hayvancılık ve pirinç üretimi) ve dörtte biri petrol ve doğal gaz sektöründeki kaçaklardan kaynaklanmaktadır. Bilim insanları, metan emisyonlarının azaltılmasının iklim değişikliğiyle mücadelede hızlı sonuçlar sağlayacağını belirtmektedir. Ancak, etkin önlemler alınabilmesi için metan salınımının kaynaklarının ve miktarının doğru tespit edilmesi gerekmektedir (Shindell, 2021). İklim değişikliğinin ikinci en büyük nedeni hâline gelen metan gazı, Greenhouse Gas Protocol (GHG) altıncı değerlendirme raporuna göre, atmosferi birim başına karbondioksit kıyasla 27 kat daha güçlü bir şekilde ısıtma potansiyeline sahip olmasıyla öne çıkmaktadır. Bir başka ifadeyle, 1 kg metan salınımı, 84 kg karbondioksit emisyonuna eşdeğer bir etkiye sahiptir. Küresel metan emisyonlarının hızla artmakta olduğu göz önünde bulundurulduğunda, iklimin daha hızlı ısınacağı öngörülmektedir. Copernicus İklim Değişikliği Servisi (C3S) tarafından sağlanan veriler, metan gazı yoğunluklarının 2020 yılında, uydu kayıtlarının başladığı 2003 yılından sonraki en yüksek seviyelere ulaştığını ortaya koymaktadır. Küresel Karbon Projesi, 2017 yılında karbon emisyonlarının 2000-2006 yıllarına kıyasla %9 arttığını bildirmekte ve bu artışın başlıca iki nedeninin tarım ve atık yönetimi olduğu belirtilmektedir. İklim bilimcisi olarak Duke Üniversitesi'nde görev yapan ve Birleşmiş Milletler'in (BM) 2021 Küresel Metan Raporu'nun başyazarlığını üstlenen Dr. Drew Shindell, metan gazındaki hızlı artışın son on yıl içinde insanlar tarafından fark edildiğini ve kaydedilen bu artışın ciddi bir sorun teşkil ettiğini ifade etmektedir. Karbondioksidin havada yaklaşık 300 yıl boyunca kalabilmesi, emisyonlarının düşürülmesini acil bir gereklilik hâline getirmektedir. Buna karşılık, metanın atmosferdeki varlığı yalnızca on yılı biraz aşmakta olup, metan emisyonlarının azaltılmasının iklim değişikliğiyle mücadelede daha hızlı sonuçlar sağlayabileceği belirtilmektedir. "Metansalınımını kontrol

etmenin hem cazip hem de faydalı olduğu görülmüştür.” Ayrıca, bu emisyonları azaltmaya yönelik önlemler hızla uygulanmaya başlandığında, metan yoğunluklarında bir yıl içinde belirgin bir azalma gözlemlenebileceği belirtilmektedir (Shindell, 2021). Ayrıca, hava kirliliğine de katkıda bulunan metan gazı, atmosferin alt katmanlarında egzoz gazlarıyla etkileşime girerek, solunum sistemine zarar verebilecek ozon gazının oluşumuna neden olmaktadır. Dolayısıyla, metan emisyonlarının azaltılması, iklim değişikliği ile mücadelede sağlanacak kazanımlara ek olarak, halk sağlığı açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, iklim üzerindeki olumlu etkilerin gözle görülür hâle gelmesi için on yıl veya daha uzun bir sürenin gerekebileceği ifade edilmektedir. Dr. Shindell, “Ancak bu süre, iklim değişikliğine karşı alınabilecek diğer önlemlerin gerektirdiği zamana kıyasla oldukça kısa bir periyottur” değerlendirmesinde bulunmaktadır. Örneğin, petrol ve doğal gaz sektöründeki metan emisyonlarının önümüzdeki dört yıl içinde %45 oranında azaltılmasının, 1.300 kömür yakıtlı enerji santralının kapatılmasıyla eşdeğer bir iklim etkisi yaratacağı öngörülmektedir. Daha geniş bir perspektiften değerlendirildiğinde, Avrupa Komisyonu’na göre insan faaliyetlerinden kaynaklanan metan emisyonlarının 2050 yılına kadar %50 oranında azaltılması durumunda, takip eden 30 yıl içinde küresel ısınmanın 0,2°C gerilemesi mümkün olacaktır. Bu hedefe ulaşılabilmesi için doğru ve sürekli gözlemlerin yapılmasının büyük önem taşıdığı belirtilmektedir (Shindell, 2021). Bu çalışmada, alternatif materyallerin biyogaz üretimine katkıları ele alınmış ve bu materyallerin gelecekteki kullanımına yönelik öneriler sunulmuştur. Biyogazın yenilenebilir enerji kaynağı olarak önemine vurgu yaparak, karbon emisyonlarını düşürme potansiyeline dikkat çekilecektir. Metan emisyonlarının kontrol altına alınmasının, iklim değişikliğiyle mücadelede hızlı sonuçlar sağlayacağı ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılacağı ifade edilecektir. Ayrıca, fosil yakıtların çevresel zararları göz önüne alındığında, biyogaz üretiminin ve metan salınımlarının azaltılmasının gerektiği vurgulanıp, biyoga-

zın çevresel faydalarının, metan emisyonlarının azaltılmasının ve farklı materyallerin kullanılarak biyogazın sürdürülebilir enerji çözümleri olarak kullanılmasının incelenecektir.

1.1. Fosil yakıtlardan biyoyakıtlara geçiş

Enerji, dünyanın geleceğinde önemli bir rol oynamaktadır. Ekonomik gelişmenin temel unsuru olan enerji, tüketimi ile yaşam standartları arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır (Karaca, 2017). Dünya, enerji ihtiyacını büyük ölçüde fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Ancak, doğalgaz, kömür ve petrol gibi bu enerji kaynakları sınırlı rezervlere sahip olup, tükenme riskiyle karşı karşıyadır. Bu sınırlı kaynakların kullanımı, enerji güvenliğini tehdit etmekte ve çevresel sorunlara yol açmaktadır. Örneğin, 2022 yılında petrol ve gaz üretimi, taşınması ve işlemlerden geçirilmesi sonucu yaklaşık 5,1 milyar ton karbondioksit eşdeğeri sera gazı emisyonu meydana gelmiştir. Bu da, küresel enerji sektörünün toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %15’ini oluşturmuştur. Bu emisyonların büyük bir kısmı, petrol ve gaz operasyonlarında meydana gelen metan salınımları ve alevlenmelerden kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı olması ve çevresel etkileri, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişin gerekliliğini daha da önemli hâle getirmiştir. 2030 yılına kadar Net Sıfır Emisyon (NZE) senaryosuna (Şekil 1) ulaşabilmek için, emisyonların önemli ölçüde azaltılması gerekmektedir (International Energy Agency [IEA], 2024).



Şekil 1. Net sıfır senaryosu 2030’da emisyon azaltımları (IEA , 2024).

Günümüzde enerji, tüm toplumlar için temel bir gereksinim olarak kabul edilmektedir. Ekonomik ve sosyal kalkınmanın sağlanabilmesi için düşük maliyetli, güvenilir ve sürdürülebilir temiz enerji talebinin karşılanması zorunlu hale getirilmiştir. Bununla birlikte, küresel enerji endüstrisinin yapısı, arz ve talep süreçlerinde çevresel faktörlerin etkisiyle yeniden şekillendirilmektedir. İklim değişikliği, dünya genelindeki tüm politikaların yanı sıra enerji politikalarının da şekillendirilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Mutlu, 2013). Enerji, bir ülkenin ekonomik ve sosyal gelişiminin temel unsurlarından biridir, çünkü pek çok endüstri, hizmet ve yaşam tarzı enerjiye bağımlıdır. Nüfus artışı, sanayileşme, şehirleşme ve küreselleşme gibi faktörler, enerji talebini önemli ölçüde artırmaktadır. Nüfus artışı, daha fazla enerji kaynağına ve üretimine olan ihtiyacı artırırken, sanayileşme, enerji yoğun sektörlerde artan tüketimi tetiklemektedir. Şehirleşme, yoğun nüfuslu alanlarda enerji talebini artırarak ulaşım, aydınlatma ve ısınma gibi enerji gereksinimlerini zorunlu kılmaktadır. Küreselleşme ise uluslararası ticaret ve üretim süreçlerinde enerji kullanımını artırmaktadır. Ayrıca, enerji talebindeki artış, fosil yakıtlar gibi sınırlı kaynaklara olan bağımlılığı artırmakta ve enerji güvenliği endişelerini doğurmaktadır. Bu faktörler, ülkelerin enerji politikaları ve kaynak yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş, enerji verimliliğini artırma çabaları ve alternatif enerji teknolojilerine yapılan yatırımlar, enerji açığına karşı alınan önlemler olarak öne çıkmaktadır (Narin, 2008). Hükümetler ve şirketler, bu hedef doğrultusunda emisyon azaltma stratejileri belirleyerek, fosil yakıt kullanımını sınırlamayı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, fosil yakıtlar kaynaklı emisyonları en aza indirmeye yönelik daha fazla önlem alınması gerektiği açıkça ortaya çıkmaktadır (IEA, 2024). Ayrıca, bu enerji kaynaklarının kullanımı atmosferdeki CO₂ oranını artırarak çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Bu durum, fosil yakıtların doğaya verdiği zararı gözler önüne sermekte ve daha temiz, sürdürülebilir enerji seçeneklerine olan ihtiyacı artırmaktadır (Yürük ve Erdoğan, 2015).

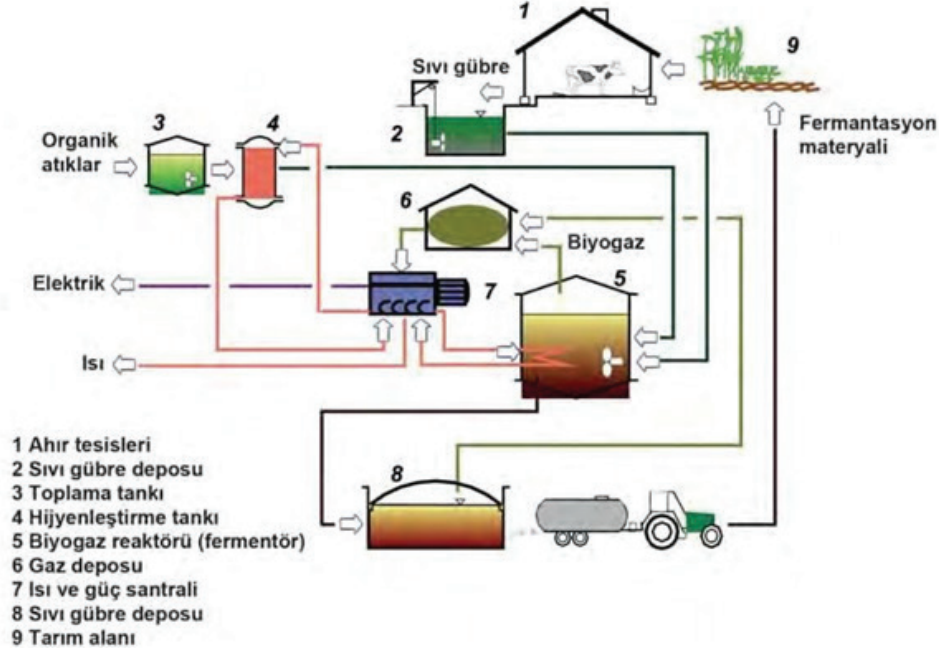
Bu ihtiyaca karşılık biyoyakıt üretimi ve tüketimi, fosil yakıtlara kıyasla sera gazı emisyonları açısından daha uygun bulunmaktadır (Şahbaz ve Sulukan, 2021). Ancak, fosil yakıtlara göre biyoyakıt üretim maliyetlerinin hâlâ yüksek olması ve fosil yakıtların üretim, iletim ve kullanım altyapısının son derece yaygın ve köklü bir şekilde yerleşmiş olması biyoyakıt üretiminin fosil yakıtlara alternatif olmasını zorlaştırmaktadır (Atelge 2021).

2 Biyogaz

Biyokütle kaynakları, hem doğrudan yakıt olarak kullanılabilen hem de biyogaz, biyokarbon ve biyodizel üretimi için büyük bir potansiyel taşımaktadır (Aydın İli Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği [ADSYB], 2011). Biyogaz, organik materyalin bakteriler aracılığıyla oksijensiz ortamda parçalanması sonucu meydana gelen bir gaz karışımıdır (İşkyürek ve Yıldız, 2015). Bir diğer ifadeyle organik atıklardan optimum koşullarda gaz üretme işlemidir. Biyogaz üretimiyle ilgili ilk çalışmalar 1895 yılında İngiltere’de gerçekleştirilmiş, II. Dünya Savaşı sırasında ise küçük ölçekli biyogaz üretim tesisleri Almanya ve Fransa’da kullanılmaya başlanmıştır. Gelişmekte olan ülkeler, biyogaz üretimi konusunda önemli adımlar atmış ve Hindistan 1939 yılında ilk biyogaz üretimini başlatmıştır. Bugün Hindistan’da 80.000’in üzerinde biyogaz üretim tesisi faaliyet göstermektedir. Tarım ve hayvancılıkla yoğun olarak geçilen bölgelerde, özellikle Çin ve diğer Uzak Doğu ülkelerinde çok sayıda biyogaz tesisi aktif olarak çalışmaktadır (Dalgıç, 2003). Türkiye’de ise biyogaz ile ilgili ilk çalışmalar 1960’lı yıllarda başlamış ve 1980’li yıllarda petrol krizi nedeniyle Köy Hizmetleri Ankara Topraksu Araştırma Enstitüsü’nde bir biyogaz birimi kurulmuş, biyogazın yaygınlaştırılmasına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Bilgin, 2003). 1980-1986 yılları arasında Merkez Topraksu Araştırma Enstitüsü’nde biyogaz üretimi üzerine yoğun araştırmalar yapılmış ve bu dönemde biyogaz üretimi hakkında birçok önemli sonuç elde edilmiştir (Çağlar, 1981). Bu araştırmalar, biyogaz üretimi konusundaki teknik bilgi ve uygulamaların gelişmesine katkı sağlamış ve biyogazın

Türkiye'deki potansiyeli ile ilgili önemli veriler sunmuştur. Organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; % 60-80 CH₄, % 20-46 CO₂, %0-2 hidrojen sülfür, az miktarda azot (N₂), su buharı ve hidrojen (H₂) bulunmaktadır (Koçer ve ark., 2006). Biyogaz üretimi için tarımsal atıklar, gıda endüstrisi atıklarından hayvansal gübrelere, mezbahane

atıklarından kağıt fabrikası atıklarına kadar geniş bir hammadde yelpazesi kullanılabilir. Ayrıca, enerji bitkileri olarak bilinen mısır ve şeker pancarı ile orman atıkları da biyogaz üretiminde değerlendirilir. Bu atıklardan bazılarının sisteme hammadde olarak beslendiği, biyogaz tesisi genel prensip şeması şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Biyogaz tesisi genel prensip şeması (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2010)

Biyogaz tesislerinde, metan dışında oluşan diğer gazlar çeşitli yöntemlerle uzaklaştırılmakta ve elde edilen metan gazı, kullanım açısından daha verimli hale getirilmek üzere iyileştirilmektedir. İyileştirilen metanın en verimli şekilde yanması için, hava ile 1/7 oranında karıştırılması gerekmektedir (Yılmaz, 2022). Metan gazı, biyogazın ısı değerini sağlayan ana bileşendir ve 1 m³ biyogazın sağladığı ısı değeri 4700-5700 kcal/m³ arasında değişmektedir. Ayrıca, 1 m³ biyogaz, 0,66 litre motorin, 0,75 litre benzin ve 0,25 m³ propan ile karşılaştırılabilir bir enerji değerine sahiptir (Yılmaz ve ark., 2017). Metan gazı, karbondioksit göre GHG altıncı değerlendirme raporuna göre 27 kat daha fazla sera etkisi yaratmaktadır. Bu nedenle, hayvansal, bitkisel ve endüstriyel atıklardan biyogaz üretimi, yalnızca ekonomik getiri sağlamakla kalma-

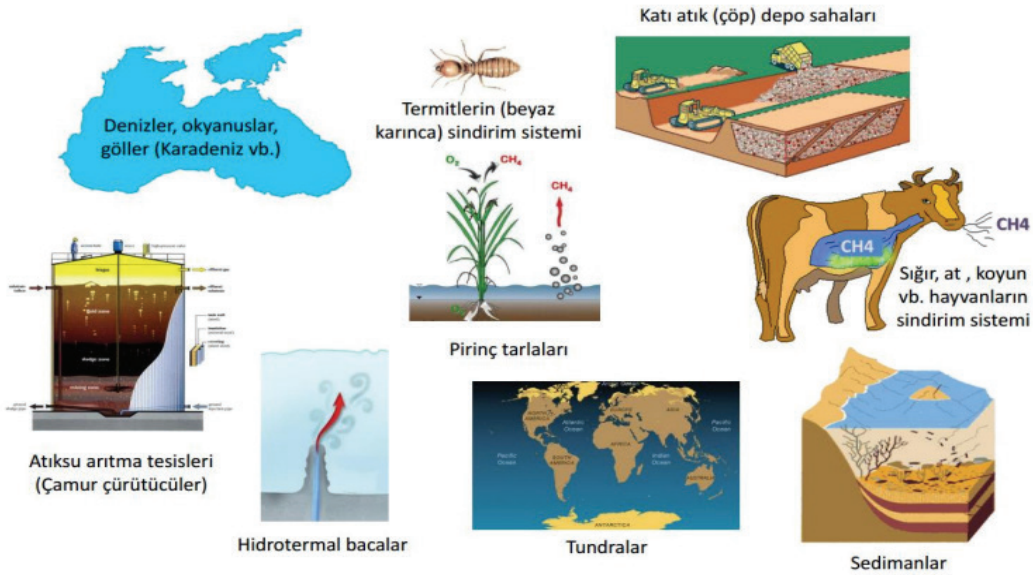
yıp aynı zamanda çevresel açıdan da önemli faydalar sunmaktadır. Avrupa, biyogaz üretimine öncelik vererek yalnızca enerji sektöründe değil, aynı zamanda tarım ve atık yönetimi gibi alanlarda da sürdürülebilir çözümler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Gelecekte yaşanabilecek petrol ve enerji krizleri karşısında biyogazın stratejik önemi daha da artarken, atık yönetimi süreçlerinde de önemli bir alternatif sunmaktadır (Yılmaz ve ark., 2017). Ayrıca, biyogaz üretimi sonucunda elde edilen katı ve sıvı organik yan ürünler, tarım sektöründe gübre olarak değerlendirilerek verimliliği artırmaktadır. Anaerobik fermantasyonun en büyük avantajlarından biri ise, bu süreçte patojen mikroorganizmaların büyük ölçüde ortadan kaldırılmasıdır (Çetinkaya, 2016), bu da gıda emniyeti ve kamu sağlığı açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Türkiye, 12,5

milyon ton organik atık potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu potansiyel yeterince değerlendirilmemektedir. Biyogazın çevresel ve ekonomik faydalarına rağmen, ülkemizde bu alandaki çalışmalar sınırlıdır. Türkiye'nin enerji ihtiyacının karşılanmasında, özellikle tarımsal, hayvansal ve evsel atıkların anaerobik işlemlerle değerlendirilmesi gerekmektedir. Fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, uzun vadeli enerji stratejilerinin temel bir unsuru olarak kritik öneme sahiptir (Nacar Koçer ve ark., 2006).

2.1. Biyogaz oluşan alanlar

Biyogaz üretimi, yalnızca organik atıkla-

rın çevre dostu bir şekilde değerlendirilmesi değil, aynı zamanda birçok farklı alanda da önemli faydalar sağlamaktadır. Bu üretim süreci, denizler, okyanuslar ve göller gibi su ekosistemlerinden, beyaz karıncaların sindirim sistemlerine kadar geniş bir yelpazede biyolojik süreçlerin rol oynadığı bir dizi alanı kapsamaktadır. Ayrıca, katı atık depo sahaları, pirinç tarlaları, küçük baş, büyük baş ve at sindirim sistemleri gibi doğal ve yapay ortamlarda da biyogaz üretimi mümkündür. Atık su arıtma tesisleri, sedimanlar, tundralar ve hidrotermal bacalar gibi çevresel sistemlerde de biyogaz açığa çıkabilir (Şekil 3) (Çelikkaya, 2016).



Şekil 3. Biyogaz(CH₄) üretilen ortamlar (Çelikkaya, 2016).

Bu alanlar, biyogaz üretimi sürecinde kullanılan organik maddelerin farklı ekosistemlerde dönüştürülmesiyle enerji elde edilmesini sağlayan önemli çevresel kaynaklardır. Biyogaz, yalnızca enerji üretimi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon emisyonlarının azaltılması, atık yönetimi ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi gibi birçok açıdan faydalı çözümler sunmaktadır.

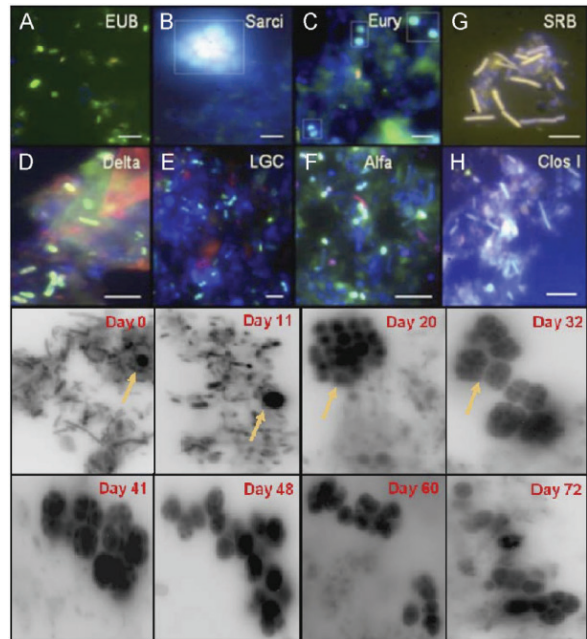
2.2. Biyogaz oluşumunu etkileyen faktörler

Biyogaz oluşumunu ve kalitesini etkileyen faktörler arasında, oksijen (Çelikkaya, 2016), pH (Ziauddin ve Rajesh, 2015), reak-

tör sıcaklığı (Adekunle ve ark., 2015), toksik maddeler (Vijayalekshmy, 1985), uçucu yağ asitleri (Yadava ve Hesse, 1981), organik yükleme oranı (Adebayo ve ark., 2015), C/N oranı (Ahring ve ark., 1995), hidrolik bekleme süresi (Najafpour, 2015) olarak bazıları sıralanabilmektedir. Oksijensiz ortamlarda metan üreten mikroorganizmalar, atmosferin oluşmasından önce var olan organizmalardır ve anaerobik ortamlarda metabolizmalarını sürdüren organizmalardır. Fermantasyon ünitelerinde oksijenin tamamen engellenmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda, toksijensiz ortamlarda üreyen metan oluşturucu mikroorganizmalar yaşamlarını

sürdürebilmek için adaptasyonlar gösterir. Oksijen tüketen bakteriler, ortamdaki oksijeni azaltarak, oksijensiz ortamda metan üreten mikroorganizmaların yaşamına olanak tanır. Bu nedenle, fermantasyon ünitelerinde oksijen seviyelerinin dikkatle kontrol edilmesi önemlidir. Ayrıca, fakültatif oksijensiz ortamlarda üreyen metan oluşturucu mikroorganizmalar, hem oksijenli hem de oksijensiz ortamlarda yaşayabilme yeteneğine sahiptir (Çelikkaya, 2016). Biyogaz üretimi, organik maddelerin anaerobik ortamda bakteriler tarafından parçalanmasıyla gerçekleşen bir süreçtir ve bu süreç metan gazı üretimi sağlar. Bu süreçte, pH değeri, metan üreten bakterilerin etkinliğini doğrudan etkiler. Biyogaz üretimi için en uygun pH aralığı 6,8 ile 7 arasındadır. Anaerobik fermantasyonun erken aşamalarında, asit üreten bakterilerin aktivitesi artarak pH değerinin düşmesine neden olabilir. Eğer pH değeri 6,7'nin altına düşerse, metanojen bakteriler üzerinde toksik etkiler ortaya çıkar ve bu durum biyogaz üretimini olumsuz etkiler. Asitlerin artışı ortamı asidik hale getirir ve verimliliği düşürür. Asit oluşumunun kontrol altına alınabilmesi için pH seviyesi stabilize edilmelidir. Bu amaçla sönmüş kireç gibi alkali maddeler kullanılabilir (Hoşgören, 2018; Ziauddin ve Rajesh, 2015). Ayrıca, pH seviyesi sürekli olarak izlenmeli ve kontrol altında tutulmalıdır. pH seviyesindeki dalgalanmalar, biyogazın CO₂ içeriğini artırabilir ve verimliliği düşürebilir (Gülen, 2005). Sıcaklık, biyogaz üretimi için çok önemli bir parametredir çünkü anaerobik mikroorganizmaların etkinliği doğrudan sıcaklığa bağlıdır. İdeal sıcaklık aralığı 30°C ile 40°C arasında olup, bu sıcaklık aralığında metan üreten bakteriler en verimli şekilde çalışır. Ancak, sıcaklık 10°C'nin altına düştüğünde, bu bakterilerin aktivitesi azalır ve biyogaz üretimi durabilir. Düşük sıcaklıklar mikroorganizmaların metabolizmasını yavaşlatır ve biyogaz üretiminin hızını düşürür. Bu nedenle biyogaz tesislerinde sıcaklık kontrolünün sağlanması gerekmektedir (Millî Eğitim Bakanlığı, 2011). Biyogaz üretimi için ideal karbon-azot (C/N) oranı genellikle 20-30:1 arasındadır. Bu oran, mikroorganizmaların büyümesi ve biyogaz

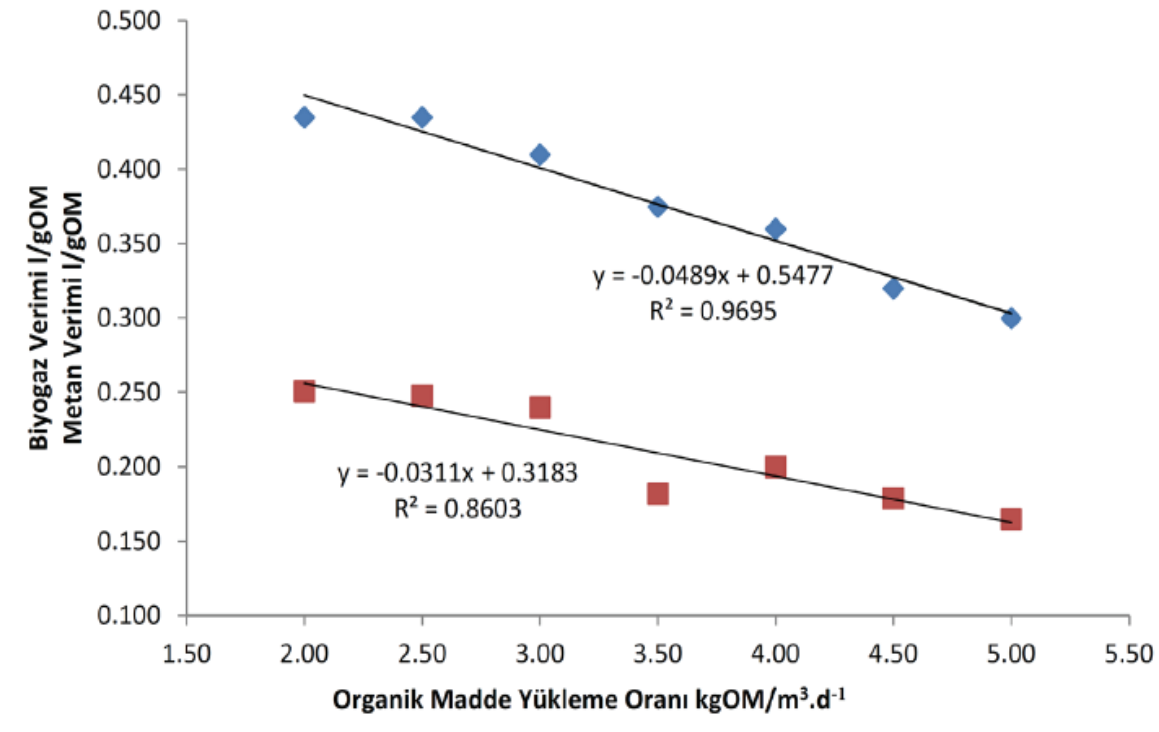
üretimi için gerekli dengeyi sağlar. C/N oranı çok düşükse, fazla azot amonyak birikimine yol açar ve bu durum mikroorganizmaların etkinliğini engeller. Çok yüksek C/N oranı ise karbon fazlalığına yol açarak metan üretimini sınırlayabilir (Ahring ve ark., 1995). C/N oranının dar olması, bakterilerin atıkları daha hızlı ayrıştırmasına neden olabilir, ancak oran çok dar olduğunda istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Hidrolik Bekleme Süresi (HRT), biyogaz üretiminde organik maddelerin reaktörde kalma süresidir. HRT, iklim, sıcaklık, hammadde bileşimi gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Optimum HRT, biyogaz verimini artırırken sürenin gereğinden uzun tutulması tesis kapasitesini düşürür ve maliyetleri artırabilir. HRT genellikle 20-120 gün arasında değişir, ancak 60 günün üzerindeki sürelerde mikroorganizma popülasyonunun azalması nedeniyle biyogaz verimi düşebilir. HRT'nin belirlenmesinde, bakteri popülasyonunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Lübken ve ark., 2007; Öztürk, 2005). Ayrıca, 60 günün üzerinde mikroorganizma popülasyonunun azalması nedeniyle biyogaz verimi düşebilir. Bu nedenle, HRT'nin belirlenmesinde bakteri popülasyonu da göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 4), (Lübken ve ark., 2007).



Şekil 4. Biyogaz sürecinde bekleme süresinin mikrobiyal dinamikleri ve mikroskopikanalizi

Organik Yükleme Oranı (OMYO), biyogaz üretiminde mikroorganizmaların beslenmesi için reaktöre eklenen organik madde miktarını ifade eder. OMYO, proses sıcaklığı, hammadde bileşimi ve bekleme süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Optimum seviyenin altındaki yükleme, gaz üretimini düşürürken, aşırı yükleme pH dengesini bozarak süreci olumsuz etkileyebilir. Araştırmalar, 1-3,2 kgUKM/m³ gün

aralığının ideal olduğunu ve 2 kgUKM/m³ gün üzerindeki yüklemelerin biyogaz ve metan verimini azaltabileceğini göstermektedir. (Şekil 5). Ayrıca, yüksek OMYO köpük oluşumunu tetikleyerek reaktörün mekanik ve biyolojik süreçlerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, biyogaz üretiminin verimliliği için OMYO'nun dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir (Adebayo ve ark., 2015).



Şekil 5. Sığır atıklarından biyogaz üretiminde organik madde yükleme oranının metan ve biyogaz verimliliğine etkisi (Adebayo ve ark., 2015).

Bu faktörler biyogaz üretiminin verimliliği ve kalitesini doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir. Bu nedenle, biyogaz üretim süreçlerinde bu parametrelerin dikkatle izlenmesi ve optimize edilmesi gerekmektedir.

3. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Geleneksel Materyaller

Biyogaz üretimi için geleneksel olarak kullanılan materyaller, özellikle tarımsal atıklar, gıda atıkları ve hayvansal gübreler gibi organik maddelerdir. Tarımsal atıklar, biyo-

gaz üretiminde sıklıkla kullanılan hammadde-lerdir çünkü bu materyaller kolayca temin edilebilir ve biyokütle olarak yüksek enerji potansiyeline sahiptir. Hayvansal gübreler, özellikle metan gazı üretiminde yüksek verimliliğe sahip olup, büyük çiftliklerde biyogaz üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Uysal ve Öztürk, 2020). Bunun dışında, gıda endüstrisinden çıkan atıklar da biyogaz üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Biyogaz teknolojisi, farklı organik kaynakların kullanılabilirdiği bir enerji üretim ve atık yönetim prosesi olarak görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Biyokütle kaynakları
(Biomass in India, 2017).

Bu kapsamda kullanım amacına bağlı olarak farklı kaynaklardan gelen hammaddeler tek başlarına kullanılabilir gibi farklı karışımlar oluşturularak da kullanılmaktadır. Biyogaz üretiminde, “doğal ormanlardan elde edilen odun atıkları, ormancılık ve orman endüstrisinden kaynaklanan atıklar, evsel ve endüstriyel atıklar ile hayvan atıkları gibi bitki ve hayvan materyalleri” sıklıkla kullanılmaktadır (Toklu, 2017). Bu organik atıklar, metan gazı üretimi için biyokimyasal süreçlere tabi tutulur ve bu sayede yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bu süreç, atıkların geri dönüştürülmesiyle hem enerji üretimi sağlanır hem de çevresel etkiler azaltılmış olur. Türkiye’de biyoenerji potansiyeli incelendiğinde, en yaygın kullanılan yöntemin biyogaz üretimi ve biyogaz üretiminde en yaygın kullanılan maddenin ise büyükbaş hayvan gübresi olduğu görülmektedir. Bitkisel materyaller ise, bitkisel üretim atıkları, peyzaj atıkları, biyogaz üretimi için yetiştirilen özel ürünler ve fermantasyon atıkları bu gruba dahil edilmektedir. Yapılan bir çalışmada bitkisel materyal kullanılarak 35 oC fermentasyon sıcaklığında %12 kuru madde içeriği, 30 gün bekleme süresi 4 kg/m³.d yükleme oranında en fazla üreteç özgül metan üretim miktarına ulaşılmıştır. Ancak aynı sıcaklık koşullarında %9 kuru madde oranı ve

30-40 günlük bekleme sürelerinde maksimum metan gazı üretimi gerçekleşmiştir (Kaya ve ark., 2009). Gıda endüstrisi atıkları ise, gıda üretim, işleme, paketlenme ve dağıtım süreçlerinden kaynaklanan yan ürünler veya kullanılmayan maddelerden oluşur. Bu atıklar, genellikle organik maddeler içerir ve büyük bir kısmı biyolojik olarak ayrışabilir özellikte olup yeniden değerlendirilebilir (Deniz vd., 2015). Örnek verilecek olursa yemek fabrikası atıkları, gıda işleme tesisi atıkları gibi gıda sektöründen kaynaklanan organik atıklar biyogaz tesisleri için önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Gıda atıkları, uygunsuz tedarik zinciri yönetimi ve depolama sorunları nedeniyle çevresel açıdan büyük etkiler yaratmaktadır. Asit oluşturan süreçler (karanlık fermantasyon, anaerobik sindirim) kullanılarak bu atıklardan biyoyakıtlar (Biyometan [Biyo-CH₄], Biyohidrojen [Biyo-H₂]) üretilebilir, ancak enerji verimi ve maliyet etkinliği sınırlıdır. Bu süreçlerin enerji verimliliğini ve çevresel etkilerini inceleyerek, gıda atıklarından maksimum enerji geri kazanımını sağlamak için entegre biyo-termo-kimyasal süreçler önerilmektedir (Sahota vd., 2024). Kentsel atıklar, şehirleşme ve insan faaliyetlerinin sonucu olarak ortaya çıkan evsel, ticari ve endüstriyel atıklardır. Bu atıklar, çevre kirliliğine ve sağlık sorunlarına yol açabileceği gibi, doğru yönetildiğinde enerji üretiminde kullanılabilir. Belediyenin topladığı bu atıklardan biyogaz üretimi için düzenli depolama gazı üretimi ve anaerobik çürütme gibi yöntemler kullanılır. Bu biyogazlar, yakma teknolojileriyle ısı enerjisine dönüştürülüp, mekanik enerjiye çevrilerek elektrik enerjisi üretilebilir. Yapılan araştırmalar, depo gazından elektrik üretimi için tasarlanan sistemlerin %43,1 verimle çalışabileceğini ve bu tür sistemlerin atık ısının elektrik üretiminde kullanılmasının avantajlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kentsel atıklardan enerji üretiminin önemini ve potansiyelini ortaya koymaktadır (Kankılıç ve Topal, 2015).

Diğer materyaller, biyodizel üretiminden kalan atıklar ve ağaç endüstrisi atıkları gibi çeşitli endüstrilerden elde edilen organik materyaller de biyogaz üretimi için kullanılabilir.

Ancak, kağıt endüstrisi atıkları biyogaz tesislerinde kullanılabilir bir hammadde olmasına rağmen, zor çözünebilir yapıları ve yüksek işlem gereksinimleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmemektedir. Kağıt fabrikası atıkları, biyogaz üretimi için kullanılmadan önce genellikle boyut küçültme, kimyasal arıtma, biyolojik hidroliz ve mekanik sıkıştırma gibi ön işlemlerden geçirilir. Bu işlemler, atıklardaki organik

maddelerin daha verimli bir şekilde metana dönüştürülmesini sağlar (Sözer vd., 2016). Kağıt fabrikası üretim atıklarından elek altı çamuru ile ilgili görsel şekil 7 'de gösterilmiştir. Bu atıklar kağıt üretimine uygun olmayan kısa elyaflardan oluşmakta ve katma değere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu atıklar için biyogaz üretiminde kullanılabilir olması iyi bir alternatif olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 7. Kağıt fabrikası üretim atıklarından elek altı çamuru

Biyogaz üretiminde kullanılan atıkların biyometan potansiyelleri, atıkların içerdiği organik bileşenlerin türü, konsantrasyonu, karbon-azot oranı ve biyolojik olarak ayrışabilirlik seviyesine göre belirlenir (Öztürk, 2024). Örneğin, hayvansal gübreler ve gıda atıkları genellikle yüksek biyometan potansiyeline sahipken, lignin gibi zor ayrışan bileşenler içeren kağıt endüstrisi atıkları daha düşük bir potansiyele sa-

hiptir. Ayrıca, atığın ön işlemden geçirilmesi ve proses koşullarının optimize edilmesi, biyometan gazı üretimini artırmada kritik bir rol oynar. Bu, potansiyel, enerji üretiminin ötesinde, çevresel sürdürülebilirliğin korunmasında da kritik bir rol oynar. Bu malzemelerden bazılarının yapılmış hammadde özgül metan üretim oranları (%), kuru madde oranları (%), organik kuru madde oranları(%) Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Biyogaz üretiminde kullanılacak bazı maddelerin yapılmış hammadde özgül metan üretim oranları (%), kuru madde oranları (%), organik kuru madde oranları(%)

Hammadde	Hammadde Özgül Metan Üretim Oranı (m ³ CH ₄ /kg OKM)	Kuru Madde Oranı (%)	Organik Kuru Madde Oranı (%)	Kaynakça
Kağıt Atıkları	0,30	0-10	88-90	Erdin, 1994
Gül İşleme Atıkları	0,136	5,27	71	Onursal ve ark. 2011
Dana Gübresi	0,175	8,39	44	Harris, 2008; ASAE, 2003
Süt Sığırı Gübresi	0,210	13,95	83	Marañón ve ark., 2012; ASAE, 2003
Besi Sığırı Gübresi	0,248	14,66	84	Zeeman, 2020; ASAE, 2003
Isırgan	0,27	35	82	Murpy ve ark. 2011
Alg (Laminaria sp)	0,27	-	-	Singh ve Gu, 2010; Parmar ve ark. 2011
Ayçiçeği	0,277	15	92	Murpy ve ark. 2011
Meyve Şilempesi	0,285	2,5	95	FNR, 2010
At Gübresi	0,3	29,41	66	Harris, 2008; ASAE, 2003

4. Biyogaz Üretiminde Alternatif ve Yenilenebilir Materyallerin Rolü: Performans, Sürdürülebilirlik ve Gelecek Perspektifleri

Enerji meseleleri, küresel çapta politika gündeminin en öncelikli konuları arasında yer almaktadır. Bu nedenle, politika yapımcıları sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa edebilmek için daha etkili karar destek mekanizmalarına ihtiyaç duymaktadır (Hugé vd., 2011). Organik atıklardan biyogaz üretimi, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Biyogazın avantajları ve dezavantajları ortaya konarak, diğer alternatif enerji kaynaklarıyla karşılaştırılması yapılmı-

lıdır. 1970'li yıllarda başlayan ilgi, 2000'li yıllarda Avrupa Birliği ülkeleriyle birlikte artmış ve biyogaz üretimi küresel iklim değişikliğinin önlenmesinde önemli bir katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Ülkemizin, yasal düzenlemeler ve teknolojik uygulamalarla bu sürece dahil olması ve ilgili sektörlerle gerekli teşvikleri sunması gerektiği vurgulanmaktadır (Yılmaz, 2009). Biyogaz tesisleri kurulup işletilerek, hayvansal atıkların çevresel etkileri azaltılıp ekonomik fayda sağlanmaktadır (Boyacı ve ark., 2011). Bu süreç, fosil yakıtlardan kaynaklanan kirliliği minimize ederken, sera gazı salınımlarını engelleyerek enerji tasarrufu sağlar ve sürdürülebilir kalkınmayı destekler (Yetiş ve ark., 2019). Türkiye, tarım ve hayvancılık açısından önemli bir

konumda olup, biyogaz üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir (Tırınk, 2022). Tarım alanları ve hayvancılıkla ilgili nüfusun fazla olması, biyogaz üretiminin doğru yapılması durumunda önemli bir enerji kaynağı olma fırsatını sunmaktadır (Çağlayan ve Koçer, 2014; Seyhan ve ark., 2018; Dağtekin ve ark., 2019). Bu nedenle, biyogaz enerji potansiyelinin ülkemizde etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Biyogaz üretiminde hayvansal atıklara ek alternatif ve yenilenebilir materyallerin kullanımı da söz konusudur, böylece hem enerji verimliliğini artırılmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik desteklenmektedir. Geleneksel biyogaz hammaddelerine ek olarak kullanılan algler, atık yağlar, odun artıkları ve organik çöpler, biyogaz üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir ve yeşil dönüşüm süreçlerine katkı sağlamaktadır (Kara ve Demir, 2019). Bu alternatif materyaller, biyogaz üretim kapasitesini artırırken, organik atıkların geri dönüştürülmesine olanak tanımaktadır. Özellikle tarım ve orman endüstrisinden elde edilen biyolojik atıklar, düşük çevresel etki yaratması sebebiyle ön plana çıkmaktadır (Şahin ve Kaya, 2021). Alternatif materyallerin biyogaz üretiminde kullanımı, sıfır atık hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamakta ve çevresel kirliliğin azaltılmasını sağlamaktadır (Özdemir ve Yılmaz, 2020). Performans analizi açısından, yapılan araştırmalar, algler ve deniz yosunlarının metan verimini artırarak biyogaz üretiminde yüksek enerji dönüşümü sağladığını göstermektedir (Gök ve Aydın, 2022). Büyükbaş atıklarından elde edilebilecek potansiyel biyogaz enerjisinin 2361063163 MJ ve elde edilebilecek elektrik enerjisinin 656375,63 MWh olduğu belirlenmiştir (Ertop vd., 2022). Kesimhane atıkları ve çiftlik hayvanlarının gübrelerinden elde edilebilecek biyogaz miktarı yıllık olarak 24,495 milyar m³ ve bu miktardaki biyogazdan elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı 4,41×10¹⁰ kWh'dir (Sözer, 2024). Biyogaz üretimiyle elde edilen enerji, ısıtma, aydınlatma, elektrik üretimi ve mekanik enerjiye dönüştürülerek geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sıfır atık yaklaşımı doğrultusunda, biyogaz üretimi, organik atıkların enerjiye dönüştürülerek bertaraf edilmesini sağlamakta ve çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirmektedir (Yüksel ve Koca, 2020). Teknolojik gelişmeler, biyogaz

üretiminde kullanılan hammaddelerin çeşitliliğini artırmakta ve atık yağlar ile algler gibi yenilikçi materyallerin daha verimli kullanımını mümkün kılmaktadır (Çelik ve Topçu, 2021). Gelecekte, biyoteknolojik ilerlemeler sayesinde biyogaz üretim süreçlerinin daha sürdürülebilir ve yüksek verimli hâle getirilmesi beklenmektedir. Bu doğrultuda, biyogaz üretiminde alternatif ve yenilenebilir materyallerin kullanımı, hem enerji üretim süreçlerinin sürdürülebilirliğini artırmakta hem de çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik çözümler sunmaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Biyogaz üretimi, çevre dostu, sürdürülebilir ve verimli bir enerji kaynağı olarak günümüz enerji sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Organik atıkların anaerobik ortamda mikroorganizmalar aracılığıyla metan gazına dönüştürülmesi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmakla birlikte, çevresel sürdürülebilirliği sağlamada kritik bir rol oynamaktadır. Bu süreç, yalnızca enerji üretiminde verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda atıkların geri kazanılmasını sağlayarak çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirir. Biyogaz üretiminin artan önemi, fosil yakıtların tükenebilirliği ve çevreye olan zararlı etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, biyogaz üretimi, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji sektöründe dönüşüm yaratma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, biyogaz üretiminde kullanılan alternatif materyallerin çeşitlendirilmesi, süreçlerin verimliliğini artırmakla birlikte çevresel ve ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Tarım, hayvancılık, evsel ve endüstriyel atıklar gibi farklı kaynaklardan biyogaz üretimi, atıkların geri kazanılmasını mümkün kılarak çevreye zarar vermek yerine, bu atıkları değerli enerji kaynaklarına dönüştürmektedir. Biyogaz üretiminde kullanılan materyallerin verimliliği ve biyometan potansiyeli, atıkların içerdiği organik bileşenlerin türüne, konsantrasyonuna, karbon-azot oranına ve biyolojik olarak ayrışabilirlik seviyesine bağlıdır. Bu nedenle, biyogaz üretiminde kullanılan materyallerin doğru seçilmesi ve işlenmesi, elde edilen metan gazının verimliliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Hayvansal gübreler ve gıda atıkları gibi biyolojik olarak ayrışabilir organik

materyallerin biyogaz üretiminde kullanılması, yüksek biyometan potansiyeline sahip olduğu için oldukça faydalıdır. Buna karşın, lignin gibi zor ayrışan bileşenler içeren atıkların biyogaz üretiminde kullanılması, daha düşük biyometan potansiyeli ile sonuçlanmaktadır. Biyogaz üretiminde kullanılan alternatif materyallerin çeşitlendirilmesi yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da büyük fırsatlar sunmaktadır. Biyogaz üretim sürecinde elde edilen yan ürünler, özellikle tarım sektöründe kullanılabilir katı ve sıvı gübreler gibi değerli ürünler ortaya çıkarabilmektedir. Bu, çiftçilere ek gelir kaynağı sağlamanın yanı sıra, tarımda kullanılan kimyasal gübrelerin azaltılmasına da yardımcı olur. Bu bağlamda, biyogaz üretim süreci, döngüsel ekonomi ilkelerine dayalı bir sistem olarak çevresel ve ekonomik faydalar yaratmaktadır. Biyogaz üretiminde kullanılan materyallerin çeşitlendirilmesi sürecinin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artırmak adına, çeşitli öneriler ve çıkarımlar yapılabilir. İlk olarak, biyogaz üretiminde kullanılan atıkların özelliklerinin daha iyi anlaşılması için bilimsel araştırmaların derinleştirilmesi gerekmektedir. Atıkların biyolojik ayrışabilirliği, karbon-azot oranı gibi parametrelerin biyogaz üretim verimliliği üzerindeki etkileri konusunda daha fazla bilgi edinilmesi, daha verimli biyogaz üretim yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, biyogaz üretiminde kullanılan materyallerin çeşitlendirilmesinin yanında, biyogaz tesislerinin teknolojik açıdan geliştirilmesi ve optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Yeni teknolojilerin, biyogaz üretim süreçlerinde verimlilik artışı sağlayabilecek potansiyel taşıdığı unutulmamalıdır.

Özellikle, biyogaz üretim tesislerinde kullanılan anaerobik çürütme sistemlerinin iyileştirilmesi ve daha verimli hale getirilmesi, biyogaz üretim kapasitelerinin artırılmasına olanak tanıyacaktır. Biyogaz üretimi alanında daha geniş bir etki sağlamak adına, yerel yönetimlerin ve sanayi kuruluşlarının biyogaz tesislerine yatırım yapması teşvik edilmelidir. Bu tür yatırımlar, yerel enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında ve enerji bağımsızlığının artırılmasında önemli bir rol oynayacaktır. Ayrıca, biyogaz üretim sürecinde elde edilen enerji, şebekeye aktarılabilir ve bu da enerji arzının güçlendirilmesine katkı sağlar. Son olarak, biyogaz üretimi sürecinde daha geniş bir atık yönetimi stratejisinin benimsenmesi, çevreyi korumaya ve enerji tasarrufuna önemli katkılar sağlayacaktır. Biyogaz üretimi, atıkların bertaraf edilmesi ve çevreye zarar vermemesi açısından önemli bir çözüm sunmakta ve yeşil dönüşüm süreçlerinin hızlandırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu dönüşüm süreci, çevre dostu teknolojilerin benimsenmesi ve enerji üretiminin sürdürülebilir şekilde yapılması adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Özetle, biyogaz üretimi, çevre dostu enerji üretiminin bir aracı olarak, fosil yakıtların yerine geçebilecek önemli bir alternatif enerji kaynağı sunmaktadır. Bu alandaki gelişmelerin, biyogaz üretimindeki verimliliğin artırılması ve bu sürecin daha geniş bir alan ve daha fazla kaynakla uygulanabilmesi adına büyük katkılar sağlayacağı kesindir. Gelecekte biyogaz üretiminde kullanılan alternatif materyallerin çeşitlendirilmesi, sadece çevresel sürdürülebilirlik için değil, aynı zamanda enerji sektöründeki dönüşüm için de önemli fırsatlar sunacaktır.

Kaynaklar

- Acaroğlu, M., (2003). Alternatif Enerji Kaynakları, Ders kitabı Atlas yayın dağıtım, İstanbul.
- Adebayo, A. O., Jekayinfa, S.O., Linke, B. (2015). Effects of Organic Loading Rate on Biogas Yield in a Continuously Stirred Tank Reactor Experiment at Mesophilic Temperature. *British Journal of Applied Science & Technology*, 11(4): 1-9.
- Adekunle, K.F.; Okolie, J.A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Adv. Biosci. Biotechnol.*, 6, 205–212.
- Atelge, M. R. (2021). The Potential of Biogas Production as a Biofuel From Cattle Manure in Turkey and Projected Impact on the Reduction of Carbon Emissions for 2030 and 2053. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(1), 56-64.
- ADYSB, 2011. Aydın İli Biyogaz Potansiyeli Fizibilite Raporu. Aydın: Aydın İli Damızlık Sığır Yetiştiricileri Birliği - Güney Ege Kalkınma Ajansı.
- Ahring, B. K., Westermann, P., & Angelidaki, I. (1995). Anaerobic treatment of animal waste and other organic substrates. *Environmental Technology*, 16(6), 549-559.
- ASAE. (2003). The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems Standard D384.1 FEB03 Manure Production and Characteristics, USA.
- Berk, F. & Kışlahoğlu, M. B., 1993. *Çevre ve Ekoloji*, 4.Basım, Remzi Kitabevi, İstanbul.
- Boyacı S, 2017. Kırşehir İlinin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 4 (4): 447-455.
- Biogas in India (2017). What Goes Around Comes Around: 2017. Retrieved from <http://www.whatsupgermany.de/clean-energy/hydropower-bioenergy/>
- Bilgin, N., 2003. Biyogaz Nedir?, Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Ankara Araştırma Enstitüsü.
- BP. (2023). BP statistical review of world energy 2023. BP. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Çağlayan GH, Koçer NN, 2014. Muş İlinde Hayvan Potansiyelinin Değerlendirilerek Biyogaz Üretimini Araştırılması. *Muş Alparlan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 215-220.
- Çelik, M., & Topçu, Z. (2021). Gelecekte biyogaz üretiminde kullanılacak yenilenebilir materyaller ve teknolojiler. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 78-88.
- Çetinkaya, H. (2016). Biyogaz. Fırat Kalkınma Ajansı.
- Çağlar, A., ve Uçar, T. (1981). Türkiye’de Biyogaz Potansiyeli ve Üretim Kinetiği. Uluslararası Biyogaz Semineri, 290-303.
- Canka Kılıç, F., (2011). *Türkiye’deki Yenilenebilir Enerjilerde Mevcut Durum ve Teşviklerindeki Son Gelişmeler, Mühendis ve Makine*, Cilt:52, Sayı:614, ss:103-115.
- Dağtekin M, Aybek A, Bilgili ME, 2019. Adana ve Mersin’de Bulunan Etlik Piliç Kümeslerinde Oluşan Gübrenin Biyogaz ve Elektrik Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34 (2): 9-22.
- Dalgıç, A.C., 2003. Biyogaz Uygulamaları, Müh. Fak., Gıda Mühendisliği Böl., Gaziantep.
- Demirbaş, A., & Yıldız, A. (2021). Biyogaz üretimi ve uygulamaları: Temel ilkeler ve süreçler. *Çevre Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi*, 5(3), 123-136.
- Demir, A. Y. (2024). Fıstık yaprağı ekstreğinden demir oksit yeşil sentezi ve sodyum borhidrürün hidrolizinde katalizör destek malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması (Yüksek lisans tezi). Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Deniz, E., Yeşilören, G., Özdemir, N., ve İşçi, A. (2015). Türkiye’de gıda endüstrisi kaynaklı biyokütle ve biyoyakıt potansiyeli. *Gıda*, 40(1), 47-54. <https://doi.org/10.15237/gida.GD14037>
- Erdin, E. (1994). Kırsal alanlarda oluşan organik atıklar ve bunlardan biyogaz üretimi. 15. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü, Antalya, Türkiye.
- Ertop, H., Atılğan, A., Saltuk, B. Aksoy, E., (2022). Büyükbaş Hayvansal Atıklardan Elde Edilebilir Biyogaz ve Elektrik Üretim Potansiyelinin Belirlenerek Sayısal Haritaların Oluşturulması *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 530-540.
- FNR. (2010). *Biyogaz Kılavuzu*, Üretimden Kullanıma, Yenilenebilir Hammadde İhtisas Ajansı Türk-Alman Biyogaz Projesi, Gülzow, Almanya.
- Greenhouse Gas Protocol. (2024, Ağustos). IPCC Global Warming Potential Values. Greenhouse Gas Protocol. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf> (Erişim Tarihi: 01.02.2025)
- Gök, E., & Aydın, T. (2022). Alternatif biyogaz hammaddeleri ve çevresel faydaları. *Biyoteknoloji ve Biyomühendislik Dergisi*, 11(2), 56-65.
- Gülen, J., ve Arslan, H. (2005). Biyogaz üretim sürecinde pH değeri, reaksiyon hızı ve diğer kritik parametreler. Sigma, Yıldız Teknik Üniversitesi. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*.

- Harris, P., (2008). Anaerobic digestion model. http://www.adelaide.edu.au/biogas/anaerobic_digestion/modell/ erişim tarihi: 16/12/2005
- Hossain, M. S., Wasima, F., Banik, S., Kibria, M. G., & Shawon, M. S. H. (2025). Prospect of green vehicle sectors in Bangladesh in light of biogas from animal manure through anaerobic digestion. *Fuel*, 395, 135276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135276>
- Hoşgören, G. (2018). Bağlam temelli kavram karikatürlerinin asit-baz konusunun öğretiminde etkililiğinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilgisi Eğitimi Bilim Dalı.
- Hugé, J., Waas, T., Eggermont, G., & Verbruggen, A. (2011). Impact assessment for a sustainable energy future—Reflections and practical experiences. *Energy Policy*, 39(10), 6243-6253. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.023>
- IEA. (2024). <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels>.
- International Energy Agency. (2023). World energy outlook 2023. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- Işıkürek, Ç., Yaldız, O. (2015). Bir Biyogaz Tesisi için PLC Otomasyon Sistemi Tasarımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(1), 89-96.
- Kankılıç, T., ve Topal, H. (2015). Belediye atıklarından düzenli depolama sahalarında biyogaz ve enerji üretimi. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 58-69.
- Karaca, C. (2017). Hatay ilinin hayvansal gübre kaynağından üretilebilir biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi / Journal of Agricultural Faculty of Mustafa Kemal University*, 22(1), 34-39. <https://doi.org/10.13001/9362>
- Kara, H., & Demir, B. (2019). Alternatif biyogaz hammaddeleri ve çevresel faydaları. *Biyoteknoloji ve Biyomühendislik Dergisi*, 11(2), 56-65.
- Kaya, D., Tiris, M., Yaldız, O., Saraç, İ., Ekıncı, K., Koçar, G., Karaman, N., Ayan, E., & Saraç, M. (2009). Bitkisel ve hayvansal atıklardan biyogaz üretimi ve entegre enerji üretim sisteminde kullanımı (biyogaz) projesi. *Engineer & the Machinery Magazine / Mühendis ve Makina*, 593, 2. <https://doi.org/10.13001/3402>
- Koçer, N.C., Öner, C., Sugözü, İ. (2006): Türkiye’de Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.
- Lopez, A. F., Rodriguez, T. L., Abdülmelik, S. F., Martinez, M. G., & Bello Bugallo, P. M. (2024). Biogas to biomethane: A detailed review of technologies enhancing sustainability and reducing greenhouse gas emissions. *Applied Sciences*, 14(6), 2342. <https://doi.org/10.3390/app14062342>
- Lübken, M., Wichern, M., Schlattmann, M., Andreas Gronauer, A., Horn, H. (2007). Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops. *Water Research*, 41, 4085-4096.
- Marañón, E., Castrillón, L., Quiroga, G., Fernández-Nava, Y., Gómez, L., García, M.M. (2012). Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Manag.* 2012, 32, 1821–1825.
- Murphy JD., Braun R., Weiland P., Wellinger, A. (2011). Biogas from Crop Digestion. IEA Bioenergy Task 37. Erişim Adresi: <http://www.iea-biogas.net/>.
- Mutlu, E. (2013). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Ekonomisi ve Ankara İli’nde SWOT Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Nacar Koçer, N., Öner, C., Sugözü, İ. (2006). TÜRKİYE’DE HAYVANCILIK POTANSİYELİ ve BİYOGAZ ÜRETİMİ. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 17-20.
- Najafpour, G. D., Younesi, H., ve Khodakaramian, G. (2015). Biogas production from citrus wastes: Pretreatment and co-digestion strategies. *Bioresource Technology*, 101(14), 5243-5248.
- Narin, M. (2008). Türkiye’nin Enerji Yapısı ve İzleyeceği Öncelikli Politikalar. *ASO Dosya Ankara Sanayi Odası Dergisi*, Ağustos-Eylül, 50-68.
- Ojolo, S.J., Oke, S.A., Animasahun, B.K., Adesuyi, B.K. (2007). Utilization of Poultry, Cow and Kitchen Wastes for Biogas Production: A Comparative Analysis, *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4(4): 223-228.
- Onursal, E., Oechsner, E., Ekinci, K. (2011). Biogas Production Potential Of Rose Oil Processing Wastes And Quail Manure İn Türkiye: Assessment By Hohenheim Batch Test, *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi (Journal of Agricultural Machinery Science)* 2011, 7 (4), 393-398.
- Özdemir, H., Yılmaz, S. (2020). Yeşil dönüşüm ve biyogaz üretiminde alternatif materyallerin katkıları. *Environmental Technology & Innovation*, 19(6), 79-92.
- Öztürk, M. (2005). Hayvan gübresinden biyogaz üretimi. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşarlığı, Ankara.
- Öztürk, M. (2024). Anaerobik çürütme tesislerinde kullanılan bazı atık türleri. *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, 191. Sayı.
- Parmar, A., Singh, N, K., Pandey, A., Gnanounou, E., Madamwar D. (2011). Cyanobacteria and microalgae: a positive prospect for biofuels *Bioresource Technology*, 102 (22), pp. 10163-10172.
- Sahota, Ş., Kumar, S., & Lombardi, L. (2024). Gıda atıklarından biyogaz, biyohidrojen ve biyogaz üretimi: Son gelişmeler, teknik darboğazlar ve beklentiler. *Energies*, 17(3), 666. <https://doi.org/10.3390/en17030666>
- Seyhan AK, Badem A, 2018. Erzincan İlindeki Hayvansal Atıkların Biyogaz Potansiyelinin Araştırılması. *Academic Platform Journal Of Engineering And Science*, 6 (1): 25-35.
- Shindell, D. (2021). Global Methane Assessment: Benefits of Mitigating Methane Emissions. United Nations Environment Programme.
- Singh, J., Gu, S. (2010). Commercialization potential of microalgae for biofuels production *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 2596-2610.

- Sözer, S. (2024). Türkiye'deki Kesimhane Atıklarından ve Çiftlik Hayvanları Gübrelereinden Elde Edilebilecek Biyogaz Potansiyelinin Tespiti Üzerine Bir Araştırma. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(4), 627-634. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1463671>
- Sözer, S., Kabaş, Ö., & Ünal, İ. (2016). Biyogaz Üretimini Arttırmada Kullanılan Ön İşlemlere Bir Bakış. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 12(3), 171-176.
- Şahbaz, M., Sulukan, E. (2021). Modeling biomass-based biofuel production and developing a reference energy system for the agricultural sector in Turkey. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 58(2), 171-180. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.731470>
- Şahin, D., Kaya, M. (2021). Yenilenebilir ve sürdürülebilir biyogaz hammaddeleri ve çevresel etkileri. *Journal of Renewable Energy and Sustainability*, 15(1), 45-57.
- T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2010). *Biyogaz Kılavuzu* (Gözden geçirilmiş baskı). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/edioridosyalbiyogaz%20kılavuzu%20pdf.pdf> (Erişim Tarihi: 05.02.2025)
- T.C. Millî Eğitim Bakanlığı Aile ve Tüketici Hizmetleri. *Organik Atıklar*. 2011. http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Organik%20At%20C4%B1klar.pdf (Erişim Tarihi: 27.12.2024).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A. (2002). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- Tırınk S, 2022. Hayvansal Atıkların Biyogaz Üretim Potansiyelinin Hesaplanması: Iğdır İli Örneği. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1): 152-163.
- Toklu, E., (2017). "Biomass energy potential and utilization in Turkey", *Renewable Energy*, Volume 107, pp. 235-244.
- Vijayalakshmy, M.V. (1985). *Biogas Technology Information Package*. Bombay: Tata Energy Research Institute.
- Yüksel, G., & Koca, B. (2020). Biyogaz üretimi ve sıfır atık yaklaşımlarının entegrasyonu. *Journal of Environmental Engineering*, 42(8), 342-349.
- Zeeman, G.; Gerbens, S. CH4 Emissions from Animal Manure. Available online: <https://research.wur.nl/en/publications/ch4-emissions-from-animal-manure>.
- Ziauddin, Z., Rajesh, R. (2015). *Production and Analysis of Biogas from Kitchen Waste*, *International Research Journal of Engineering And Technology*, 2(4): 622-632.
- Uysal, Y., & Öztürk, S. (2020). Geleneksel biyogaz hammaddelerinin enerji verimliliği üzerine etkileri. *Enerji Dergisi*, 22(4), 189-198.
- Yadava, L.S., ve Hesse, P.R. (1981). The development and use of biogas technology in rural areas of Asia. FAO/UNDP Regional Project RAS/75/004, Project Field Document No.10.
- Yetiş AD, Gazigil L, Yetiş R, Çelikezen B, 2019. Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli: Bitlis Örneği. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (1): 74-78.
- Yılmaz, V. (2009). Sürdürülebilir bir sistemde biyogazın yeri. V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 2009 - Diyarbakır, 1-10.
- Yılmaz, A. (2022). Sivas yöresinden elde edilen sığır gübresinden biyogaz üretiminde ön işlemlerin biyogaz verimine etkisinin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T., Koçer, A. (2017). TÜRKİYE'DE BİYOGAZ ÜRETİMİ VE BİYOGAZ ÜRETİMİ İSTATİSTİK BİLGİLERİ. *Technological Applied Sciences*, 12(4), 218-232.
- Yürük F., Erdoğan P. (2015). Düzce İlinin Hayvansal Atıklardan Üretilen Biyogaz Potansiyeli ve K-Means Kümeleme ile Optimum Tesis Konumunun Belirlenmesi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4(1): 47-56.
- Zai, W., & Lin, Y. (2022). Sustainable biogas production from agricultural residues: a comprehensive review of strategies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(6), 3246-3258.