



**DENEYSEL AMAÇLI PROTOTİP BİR
BİYOGAZ REAKTÖRÜNÜN İMALATI VE
FARKLI BİYOKÜTLE KARIŞIMLARI VE
ORTAMLARDA PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Figen TAŞCI DURGUT

Doktora Tezi

**Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU
2020**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**DENEYSEL AMAÇLI PROTOTİP BİR BİYOGAZ REAKTÖRÜNÜN İMALATI VE
FARKLI BİYOKÜTLE KARIŞIMLARI VE ORTAMLARDA PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Figen TAŞCI DURGUT

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

TEKİRDAĞ-2020

Her hakkı saklıdır.



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde eksiksiz biçimde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Figen TAŞCI DURGUT

Prof.Dr. Birol KAYIŞOĞLU danıŐmanlıĐında, Figen TAŞCI DURGUT tarafından hazırlanan “Deneysel Amaçlı Prototip Bir Biyogaz Reaktörünün İmalatı Ve Farklı Biyokütle Karışımları ve Ortamlarda Performansının Değerlendirilmesi” baŐlıklı bu çalışma aŐaĐıdaki jüri tarafından 02.12.2020 tarihinde Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı ’nda Doktora tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri BaŐkanı : Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

İmza:

Üye : Prof. Dr. Ali VARDAR

İmza:

Üye : Prof. Dr. Habib KOCABIYIK

İmza:

Üye : Prof. Dr. Erkan GÖNÜLOL

İmza:

Üye : Dr.ÖĞr. Üyesi İbrahim Savaş DALMIŞ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç.Dr. Bahar UYMAZ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

DENEYSEL AMAÇLI PROTOTİP BİR BİYOGAZ REAKTÖRÜNÜN İMALATI VE FARKLI BİYOKÜTLE KARIŞIMLARI VE ORTAMLARDA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Figen TAŞCI DURGUT

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

Bu çalışmada, biyogaz üretiminin kontrollü koşullarda yapılması amacıyla deneysel amaçlı laboratuvar tipi bir biyogaz reaktörü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu reaktörde sindirim işlemi sırasında ortam sıcaklığı ve pH kontrol edilmektedir. Ayrıca, mikroorganizmaların homojen dağılımını sağlamak amacıyla kontrollü karıştırma işlemi de yapılmaktadır. Hazırlanan farklı biyokütle karışımları (sığır gübresi, yosun, peynir altı suyu), farklı sindirici sıcaklıklarında (30°, 35°, 40° ve 45°) farklı katı madde oranları ve farklı karışım oranlarında aneorobik sindirime tabi tutulmuş ve elde edilen biyogazın bileşimi saptanmıştır. Sindirim süresince tüm veriler bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Gaz bileşiminin saptanmasında Biyosistem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Gaz Kromatografi cihazından yararlanılmıştır. Denemeler sonucunda en yüksek biyogaz üretimi 276,04 mL/gKM ile kuru madde oranı %12, karışım oranı 30:20:50 ve sindirim sıcaklığı 45 °C olan 23 numaralı örnekte elde edilmiştir. Yapılan denemeler sonucu elde edilen biyogazın biyometan (CH₄) içeriği %51,0 ile %59,7 arasında değişmektedir. Düşük biyogaz üretimine karşın en yüksek biyometan (CH₄) verimi, %59,7 ile kuru madde oranı %10, 50:30:20 karışım oranı ve sindirim sıcaklığı 30 °C olan 1 numaralı örnekte bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, anaerobik sindirim, biyokütle, biyogaz reaktörü

2020, 84 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

EVALUATION OF EXPERIMENTAL PURPOSE PROTOTYPE BIOGAS REACTOR PRODUCTION AT DIFFERENT BIOMASS MIXTURES AND CONDITIONS

Figen TAŞCI DURGUT

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biosystems Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Birol KAYIŞOĞLU

In this study, an experimental laboratory type biogas reactor was designed and manufactured in order to make biogas production under controlled conditions. Temperature, pH and mixing are controlled in this reactor. Different biomass mixtures (cattle manure, seaweed, whey) were subjected to anaerobic digestion at different digester temperatures (30 °C, 35 °C, 40 °C and 45 °C) and at different mixing ratios and the composition of the biogas obtained was determined. During digestion, all data were recorded in computer environment. The Gas Chromatography device in the Biosystem Engineering Laboratory was used to determine the gas composition. As a result of the experiments, the highest biogas production was obtained sample numbered 23 with 276,04 mL / gKM, the dry matter ratio of 12%, the mixing ratio of 30:20:50 and the digester temperature of the 45 °C. The biomethane (CH₄) content of the biogas obtained as a result of the experiments varies between 51,02% and 59,66%. Despite the low biogas production, the highest biomethane (CH₄) yield was found in sample number 1 with 59,66% dry matter ratio 10%, 50:30:20 mixing ratio and digester temperature 30 °C.

Key words: Biogas, anaerobic digestion, biomass, biogas reactor

2020, 84 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Birincil enerji kaynaklarının kullanımının Dünyada ve ülkemizdeki mevcut durumu ..	2
2.2. Biyokütle enerjisi.....	3
2.3. Biyogaz	7
2.3.1. Biyogaz üretiminde kullanılan biyokütle kaynakları.....	9
2.3.2. Biyogaz Oluşum Evreleri	12
2.3.3. Biyogaz üretim sistemleri	15
3. KAYNAK ÖZETLERİ	19
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1. Materyal	31
4.1.1. Anaerobik sindirimde kullanılan materyaller.....	31
4.1.2. Deney Düzenegi	32
4.1.3. Su sirkülatör cihazı.....	33
4.1.4. Biyogaz Reaktörü	34
4.1.5. Gaz kromatografi cihazı	36
4.1.6. Ölçüm ve kontrol donanımı	37
4.1.7. PLC Kontak anahtarı ve güç kaynağı.....	39
4.1.8. PLC CPU Modülü	40
4.1.9. PLC Sıcaklık modülü GXM-40U.....	41
4.1.10. Analog Giriş / Çıkış modülü	42
4.1.11. PT100 sıcaklık algılayıcı.....	43
4.1.12. ENDA - EOP41-070ET Dokunmatik operatör paneli	44
4.1.13. Hız kontrol cihazı - AC sürücü –inverter	45
4.1.14. Trifaze güç kontaktörü	46
4.1.15. Karıştırıcı motoru	46
4.1.16. Basınç sensörü.....	47

4.1.17. Sistem Yazılımları.....	47
4.1.18. PLC Programlayıcı.....	48
4.1.19. HMI Programlayıcı	48
4.1.20. pH Probu	48
4.1.21. pH kontrol paneli.....	49
4.2. Yöntem	49
4.2.1. Biyogaz veriminin saptanması.....	51
4.2.2. Biyogazın bileşiminin saptanması	51
4.2.3. Biyogaz reaktörünün kullanılması.....	52
4.2.4. İstatistiksel analizler	52
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	53
5.1. Hammadde analiz sonuçları.....	53
5.2. Anaerobik sindirim deney sonuçları	53
5.3. Günlük biyogaz üretim miktarlarının değerlendirilmesi	57
5.4. İstatistiki değerlendirmeler	59
5.5. Geliştirilen reaktörde sindirim işleminin değerlendirilmesi	63
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	65
KAYNAKLAR.....	67

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Küresel ölçekte enerji dönüşümüne uygun biyokütle miktarları	5
Çizelge 2.2. Bazı biyokütle kaynaklarının üst ısıl değerleri	6
Çizelge 2.3. Biyogazın kimyasal bileşimi	7
Çizelge 2.4. Hayvansal artık ve yan ürünlerine ait metan üretim potansiyelleri	10
Çizelge 2.5. Bazı bitkisel kökenli yenilenebilir hammaddelerin metan üretim potansiyelleri	10
Çizelge 2.6. Tarım endüstrisinden seçilmiş bazı materyallerin metan üretim potansiyelleri...	11
Çizelge 2.7. Hidroliz aşamasındaki dönüşümler ve bakteriler	13
Çizelge 2.8. Asetojenik ayrışmanın temel elementleri ve reaksiyonlar	14
Çizelge 2.9. Metanojenik ayrışmadaki temel reaksiyonlar.....	14
Çizelge 2.10. Bazı organik kökenli hammaddelerin C:N oranları	16
Çizelge 4.1. Laboratuvar ölçekli anaerobik sindirim deneme deseni.....	50
Çizelge 5.1. Anaerobik sindirimde kullanılan hammaddelerin özellikleri.....	53
Çizelge 5.2. %10 katı madde oranında biyogaz ve biyometan verimleri.....	55
Çizelge 5.3. %12 katı madde oranında biyogaz ve biyometan verimleri.....	56
Çizelge 5.4. Katı madde biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi.....	59
Çizelge 5.5. Sıcaklık biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi	59
Çizelge 5.6. Karışım oranları biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi.....	60
Çizelge 5.7. Katı madde ile karışım oranlarının varyans analiz tablosu	60
Çizelge 5.8. Karışım oranlarının çoklu karşılaştırma (Duncan) analizi	61
Çizelge 5.9. Katı madde ile sıcaklıkların varyans analiz tablosu	61
Çizelge 5.10. Sıcaklık ve karışım oranlarının varyans analiz tablosu	62

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. 2019 yılında Dünyada birincil enerji kaynaklarının tüketimi	2
Şekil 2.2. 2019 yılında Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının tüketimi	3
Şekil 2.3. Biyokütle kaynaklarının sınıflandırılması	4
Şekil 2.4. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm teknolojileri	7
Şekil 2.5. Sürdürülebilir biyogaz döngüsü.	9
Şekil 2.6. Biyogazın oluşum aşamaları	12
Şekil 4.1 Sahilden toplanan yosunlar	31
Şekil 4.2. Deney düzeneği	32
Şekil 4.3. Deney düzeneği	33
Şekil 4.4. WiseCircu marka su sirkülatör cihazı	33
Şekil 4.5. Biyogaz reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler	34
Şekil 4.6. İmalatı tamamlanmış biyogaz reaktörü	35
Şekil 4.7. Reaktör içinde karıştırıcının konumu	36
Şekil 4.8. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı	37
Şekil 4.9. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü	37
Şekil 4.10. PLC kontrollü ölçüm ve otomasyon sistemi	38
Şekil 4.11. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı	38
Şekil 4.12. Reaktör üzerinde termokupulların yerleşimi	39
Şekil 4.13. PLC Kontakt anahtarı	39
Şekil 4.14. Güç kaynağı	40
Şekil 4.15. GLC-196T modülü	41
Şekil 4.16. PLC Sıcaklık modülü ve bağlantısı	42
Şekil 4.17. Analog Giriş / Çıkış modülü	43
Şekil 4.18. Analog Giriş / Çıkış modülü bağlantısı	43
Şekil 4.19. Kafalı tip PT100 sıcaklık sensörü	44
Şekil 4.20. Kullanılan dokunmatik operatör paneli (Ön ve Arka görünümü)	45
Şekil 4.21. İnverter	45
Şekil 4.22. Trifaze güç kontaktörü	46
Şekil 4.23. Karıştırma motoru değer girme penceresi	47
Şekil 4.24. Basınç sensörü	47
Şekil 4.25. pH probu	48
Şekil 4.26. pH kontrol cihazı	49
Şekil 4.27. Ters kademeli silindir kullanımının şematik diyagramı	51

Şekil 4.28. Agilant 7890B GC gaz kromatografi cihazı ile yapılan bir biyogaz analizi raporu örneği	52
Şekil 5.1. %10 katı madde içeriğinde sıcaklık ve karışım oranlarına göre biyogaz ve biyometan üretim değerleri.....	54
Şekil 5.2. %12 katı madde içeriğinde sıcaklık ve karışım oranlarına göre biyogaz ve biyometan üretim değerleri.....	57
Şekil 5.3. %10 katı madde içeriğinde biyogaz üretim miktarları	58
Şekil 5.4. %12 katı madde içeriğinde biyogaz üretim miktarları	58
Şekil 5.5. Sindirim süresince kaydedilen pH değerleri	63
Şekil 5.6. Biyogaz reaktörü kaydedilen basınç değişimi değerleri.....	64
Şekil 5.7. Biyogaz reaktörü kaydedilen gaz toplanma bölgesi sıcaklık değerleri	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

KM	: Kuru Madde
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
C/N	: Karbon:Azot Oranı
HBS	: Hidrolik Bekleme Süresi
XA	: Kül
UKM	: Uçucu katı madde
ADC	: Analog/sayısal çevirici
PLC	: Programlanabilir lojik kontrolcü
GC	: Gaz kromatografisi
HMI	: İnsan-Makine Arayüzü
TFT	: Thin Film Transistor
CPU	: Merkezi işlem ünitesi
PID	: Proportional Integral Derivative

TEŞEKKÜR

Tarımsal üretim sonucu ortaya çıkan biyogaz enerjisi; yenilenebilir, çevre dostu, yerel bir kaynak olarak gün geçtikçe daha büyük bir önem kazanmaktadır. Tarımsal üretimden kaynaklanan artık ve atıklar, biyogaz kaynağı olarak ülkemiz için küçümsenemeyecek bir enerji potansiyeline sahiptir.

Ülkemizde ve dünyada birçok kurum ve kuruluş bu konuya her geçen gün artan bir ilgiyle yaklaşmakta ve biyogaz enerjisi konusunun teknolojik ve bilimsel olarak geliştirilmesi ve araştırmaların yaygınlaştırılması için çalışmalar gerçekleştirmektedir. Gerek hayvansal kaynaklı gerekse bitkisel kaynaklı yüksek biyogaz varlığı sebebiyle ülkemizde modern biyogaz üretim sistemlerinin hızlı bir şekilde geliştirilmesinin ve tanıtılmasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır.

Bu araştırma kapsamında imal edilmiş olan laboratuvar tipi otomasyonlu prototip biyogaz reaktörünün ve araştırma süresince bu sistemde kullanılan yöntemlerin; sonrasında, gerek bu konuda çalışacak olan araştırmacılar için gerekse konuya ilgi duyanlara önemli bir alt yapı oluşturacağını ayrıca farklı biyokütle ve atıkların değerlendirilmesi açısından bilime ve pratiğe önemli katkılar sağlayacağını düşünüyorum.

Çalışmalarım sırasında ve her konuda bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, teşvik ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Birol Kayışoğlu'na, tez çalışmam esnasında büyük desteklerini gördüğüm Dr.Öğr.Üyesi İ. Savaş DALMIŞ'a ve Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Recai DURGUT'a, araştırmada sistemin otomasyonunun geliştirilmesinde özveri ile destek veren Öğr.Gör.Dr.Figan DALMIŞ'a ve doktora derslerini aldığım Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, oldukça yoğun bir çalışma temposu içerisinde gerçekleştirilen doktora çalışmam sırasında büyük özverilerde bulunarak, çalışmalarımı destekleyen ve her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Aralık, 2020

Figen TAŞCI DURGUT
Ziraat Yüksek Mühendisi

1. GİRİŞ

Toplumun enerji ihtiyacı, gelişen teknoloji, artan tarımsal faaliyetler ve sürekli büyüme gösteren nüfus ile birlikte her geçen yıl hızla artmaktadır. Dünyadaki fosil yakıt kaynaklarının bitme noktasına ulaşması, üretim maliyetlerinin artması, çevre kirliliği ve küresel ısınma nedeniyle, alternatif enerji kaynaklarının önemi giderek artmaktadır. Petrol, kömür ve doğalgaz gibi tükenmesi söz konusu olan, fosil kaynaklı yenilenemeyen enerji kaynaklarının yerine, güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga, biyokütle enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep giderek artmaktadır. Hayvansal ve bitkisel kökenli biyokütleden elde edilen biyogaz da önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Bilim adamları ilk kez 1630 yılında organik maddelerin anaerobik sindiriminden yanıcı bir gaz elde edilebileceğini saptamışlardır. Organik madde ile yanıcı gaz üretimi miktarı arasında doğrudan ilişki olduğu 1776 yılında belirlenmiştir. Sığır gübresinin anaerobik sindirimi esnasında oluşan yanıcı gazın metan gazı olduğu ise 1808 yılında saptanmıştır. İlk uygulama 1895 yılında İngiltere'nin Exeter şehrinde yapılmıştır. Şehir kanalizasyonunun toplandığı özel bir tesiste elde edilen biyogaz sokak lambalarında kullanılmıştır. Dünyada 1900'lü yıllardan sonra mikrobiyoloji ve bilimdeki gelişmeler doğrultusunda bu konudaki araştırmalar artmış, anaerobik bakteriler ve özellikleri saptanarak metan üretimi teşvik edilmiştir. Daha sonra petrolün bol ve ucuz sağlanması nedeniyle biyogaz konusundaki araştırmalar yavaşlamış, 1970'li yıllarda dünyadaki petrol krizi ile konu tekrar gündeme gelmiştir. Günümüzde, uzak doğuda 6-8 milyon adet aile ölçütlerinde yapılmış düşük teknoloji kullanan basit biyogaz üreteçleri ile elde edilen biyogaz, yemek pişirme, aydınlatma gibi evsel ihtiyaçların giderilmesinde kullanılmaktadır (Sözer ve Yıldız, 2006).

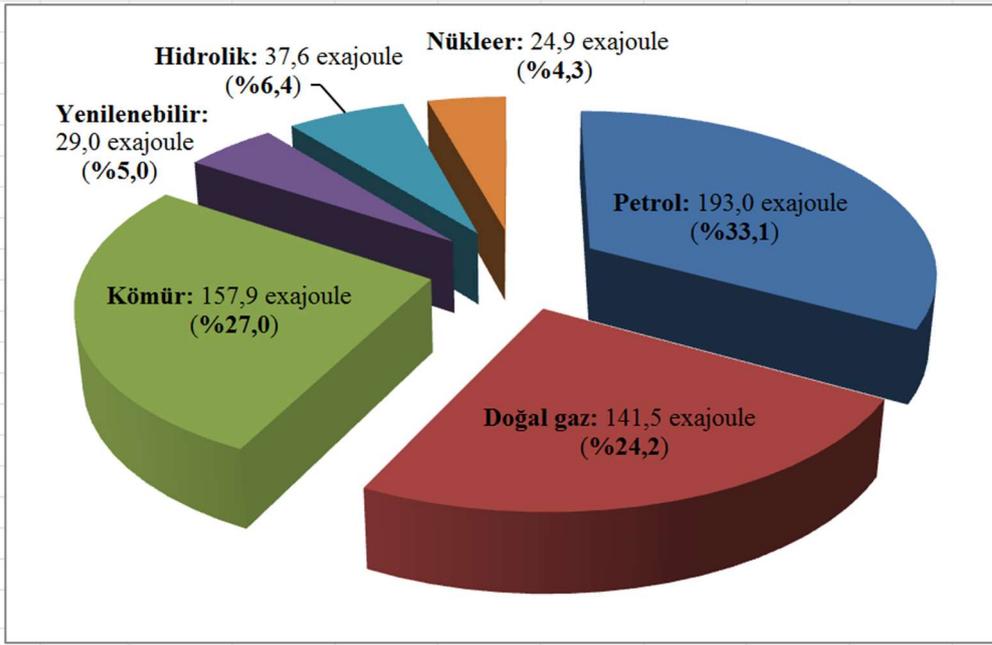
Türkiye'deki ilk araştırma-geliştirme çalışmaları ise yoğun olarak 1980-86 yılları arasında Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü bünyesinde yapılmıştır. Fakat daha sonra eğitim eksikliği ve teknik bilgi yetersizliğinden dolayı Türkiye biyogaz potansiyelini yeteri kadar değerlendirememiştir.

Biyolojik kaynaklı, hayvansal, bitkisel, gıda ve endüstriyel atık ve artıklardan (sığır gübresi, yosun, peynir altı suyu vb.), farklı koşullarda (reaktör sıcaklığı, karışım oranları değiştirilerek) oksijensiz ortamda sindirim sonucu ortaya çıkan biyogazın verim ve kalitesinin, çalışma koşullarının kontrol edildiği laboratuvar tipi biyogaz reaktörü tasarlayıp imal ederek, belirlenmesi araştırmanın ana konusudur.

2. GENEL BİLGİLER

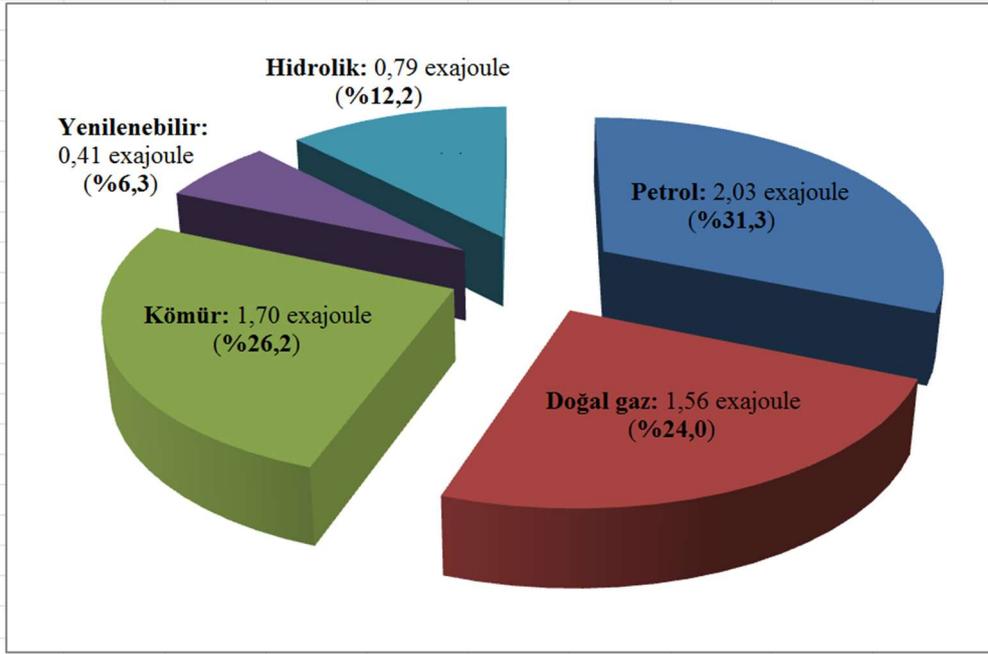
2.1. Birincil enerji kaynaklarının kullanımının Dünyada ve ülkemizdeki mevcut durumu

2019 yılında Dünyada birincil enerji kaynaklarının kullanımı toplam 583,9 exajoule olarak gerçekleşmiştir. Bu kullanımın yaklaşık %84,3'ü fosil (petrol, doğalgaz ve kömür) enerji kaynaklarından sağlanmaktadır (Şekil 2.1). Hidrolik enerji dışındaki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %5,0 dolaylarındadır.



Şekil 2.1. 2019 yılında Dünyada birincil enerji kaynaklarının tüketimi (Anonim, 2020a)

Ülkemizde ise 2019 yılında birincil enerji kaynaklarının toplam tüketimi 6,49 exajoule dolaylarında olmuştur. Dünyadaki tüketimin yaklaşık %1,1'i ülkemizde gerçekleşmiştir. Bu tüketimde hidrolik enerji hariç yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %6,3 dolaylarındadır (Şekil 2.2). Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının %5,0 olduğu düşünüldüğünde, ülkemizde bu oranın ortalamadan biraz yüksek olduğu görülmektedir.



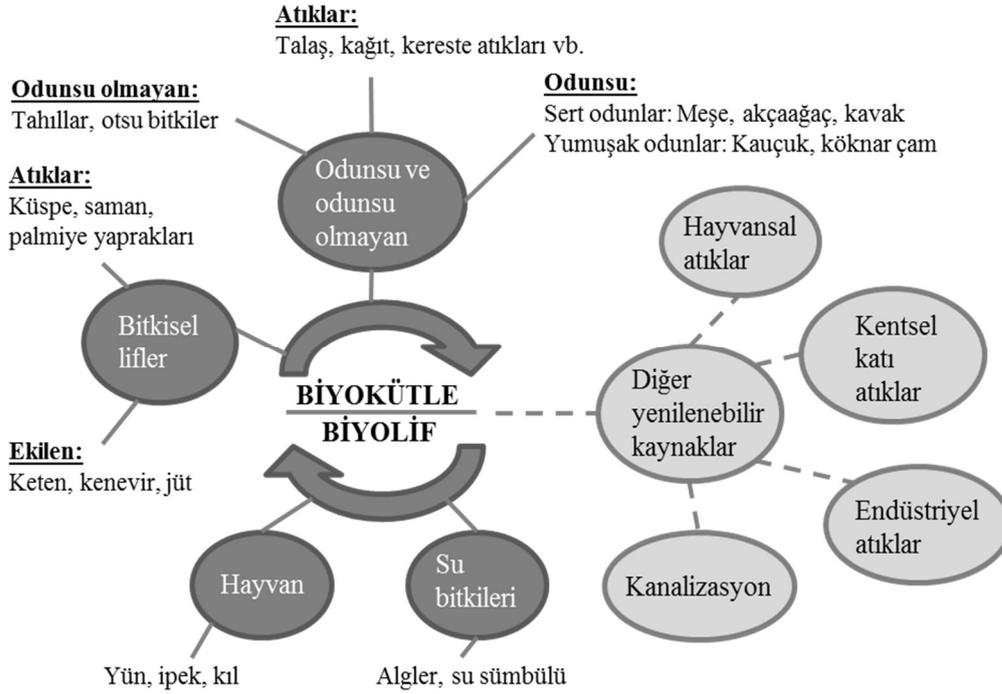
Şekil 2.2. 2019 yılında Türkiye’de birincil enerji kaynaklarının tüketimi (Anonim, 2020a)

Ülkemizdeki biokütle atık potansiyelinin 0,36 exajoule (8,6 MTEP), biyogaz üretim potansiyelinin ise 0,063-0,084 exajoule (1,5-2 MTEP) olduğu tahmin edilmektedir. 2018 yılında elektrik üretimimizin, %37,3’ü kömürden, %29,8’i doğal gazdan, %19,8’i hidrolik enerjiden, %6,6’sı rüzgârdan, %2,6’sı güneşten, %2,5’i jeotermal enerjiden ve %1,4’ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir (Anonim, 2020b). Biyogaz, biyokütle, atık ısı ve pirolitik yağ enerji santrallerinin kurulu gücü 994 MWe, kayıtlı santral sayısı 100, Türkiye’nin kurulu gücüne oranı %1,05 ve üretilen elektrik enerjisinin toplam elektrik enerjisi üretimine oranı ise 2.277 GWh elektrik enerjisi üretimi ile %0,76’dır (Anonim, 2020c). Bu değerlerden ülkemizdeki biyogaz üretim potansiyelinin yaklaşık %10’luk kısmının kullanıldığı anlaşılmaktadır.

2.2. Biyokütle enerjisi

Biyokütle, yaşamakta olan ya da yakın zamanda yaşamış olan canlı organizmalardan elde edilen, henüz fosilleşmemiş organik kökenli tüm biyolojik malzemelere verilen genel bir addır. Bitkiler güneş enerjisini kullanarak fotosentez ile biyokütle oluştururken, bu esnada atmosferde bulunan CO₂’yi kullanmakta ve O₂’yi atmosfere salmaktadırlar. Hayvanlar ise aldıkları besin elementlerini O₂ kullanarak enerji ve biyokütleye dönüştürürken CO₂’i atmosfere salmaktadırlar. Böylece, biyokütlenin oluşumu yaşam döngüsü içerisinde sürekli kendini yenileyerek gerçekleşmektedir. Biyokütle kaynakları farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Ancak, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi genellikle odunsu, odunsu olmayan, bitkisel lifler, biyolifler ve

bitkisel olmayan diğer yenilenebilir kaynaklar ana başlıkları altında sınıflandırma yapılmaktadır (Kassim vd., 2016).



Şekil 2.3. Biyokütle kaynaklarının sınıflandırılması

Biyokütlenin sürekli yenilenebilir olması ve farklı amaçlarla kullanımında bile azımsanmayacak miktarda artıklar bırakması, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini gündeme getirmiştir. Dünya’da biokütlenin enerji kaynağı olarak değerlendirilme potansiyeli Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Bir biyoyakıtın en önemli özelliği enerji içeriğidir. Biyokütlenin enerji değeri veya ısıl değeri, tam yanma sırasında birim kütle başına açığa çıkan ısı miktarıdır. Yanma sırasında açığa çıkan enerji, C, H, O, N ve S atomları arasındaki kovalent bağlara ve bunların biyokütlerdeki değerliklerine bağlıdır.

Çizelge 2.1. Küresel ölçekte enerji dönüşümüne uygun biyokütle miktarları (Woolf vd., 2010)

Biyokütle	Maksimum sürdürülebilir teknik potansiyel (Pg/yıl)*
Tarımsal ormancılık ürünleri	1,28
Biyokütle ürünleri	1,25
Çeltik	0,67
Gübre	0,59
Tahıllar (çeltik hariç)	0,42
Orman artıkları	0,29
Şeker kamışı	0,27
Hasat edilen odun	0,21
Yeşil atıklar	0,07
Toplam	5,10

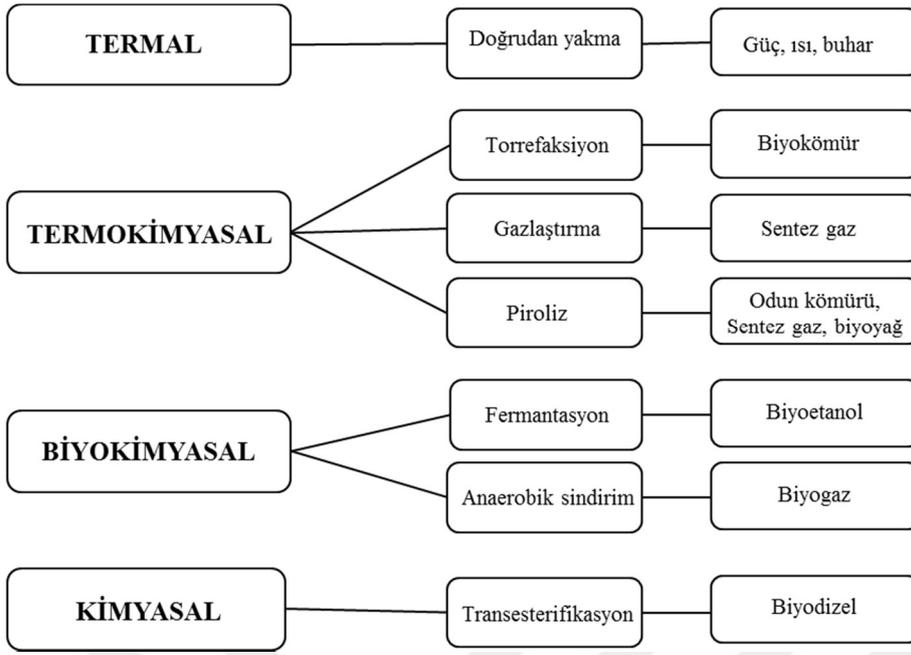
*1 Pg=1000 Tg=1000 milyon ton

Biokütlenin ısı değeri kJ/g ya da MJ/kg olarak ifade edilmektedir. Biyokütlenin ayrılabilen nemi uçurulduktan sonra kalan kuru maddenin ısı değeri Gros Kalorifik Değer (GCV) olarak adlandırılmaktadır. Bu ısı değere Üst ısı değeri (HHV) de denmektedir. Biyokütlenin doğal haliyle, yani nemi uçurulmadan ölçülen ısı değeri ise Alt ısı değeri (LHV) olarak adlandırılmaktadır. Biyokütlenin nem oranı alt ısı değerini önemli ölçüde etkilemekte ve nem oranı arttıkça azalmaktadır. Bazı biokütle kaynaklarının üst ısı değerleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı biyokütle kaynaklarının üst ısıl değerleri (Jameel vd., 2010)

Biyokütle	HHV (MJ/kg)
Şeker kamışı	17,33
Mısır sapı	22,43
Mısır tahıl	17,20
Mısır koçanı	17,65
Kök nar	21,05
Çam	20,30
Kavak	19,38
Çeltik sapı	16,28
Talaş	19,97
Talaş (Pelet)	20,48
Dallı darı	18,64
Buğday sapı	17,51

Biyokütlenin enerjiye dönüşüm teknolojileri termal, termokimyasal, biyokimyasal ve kimyasal dönüşüm teknolojileri olmak üzere 4 ana başlık altında toplanmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Biyokütlenin enerjiye dönüşüm teknolojileri

2.3. Biyogaz

Biyogaz organik atıkların anaerobik (oksijensiz) ortamda mikroorganizmalar tarafından sindirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Büyük oranda metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) gazlarını içermektedir. Biyogazın kimyasal bileşimi kullanılan biyokütlenin tipine bağlı olarak Çizelge 2.3'te verilen sınırlar içerisinde değişmektedir.

Çizelge 2.3. Biyogazın kimyasal bileşimi (Cheng, 2010)

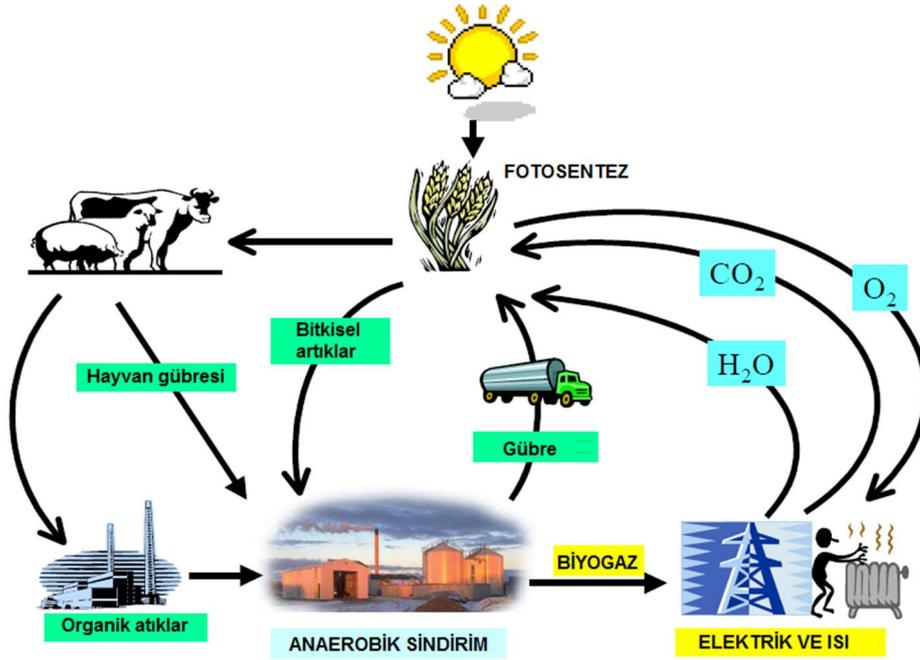
Bileşen	Kimyasal Formül	%
Metan	CH_4	50-75
Karbondioksit	CO_2	25-45
Su buharı	H_2O	2-7
Nitrojen	N_2	< 2
Hidrojen	H_2	< 1
Hidrojen sülfid	H_2S	< 1
Amonyak	NH_3	< 1
Oksijen	O_2	< 2

Biyogazın enerji değeri içerdiği metan miktarına bağı olarak 6,0-6,5 kWh/Nm³ arasında değişmektedir. Yoğunluğu ise 1,2 kg/Nm³ dolayındadır (Sevda vd., 2013).

Biyogaz üretimi fosil yakıtların sürdürülebilirliği ve çevresel kaygılar nedeniyle, son yıllarda yeniden yaygınlaşmaya başlamıştır. Ayrıca, bir çevre koruma teknolojisi olarak anaerobik çürütme, özellikle atık su arıtımı sırasında oluşan çamur olmak üzere belediye atık sularının arıtılması için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Anaerobik sindirim sonucunda enerji değeri yüksek olan biyogazın yanı sıra besin elementlerince zengin olan ve gübre olarak değerlendirilen sıvı ve katı atıklar da elde edilmektedir. Tipik bir organik katı atıktan yaklaşık %15 metan, %42,5 sıvı ve %42,5 katı yan ürün elde edilmektedir (Ostrem vd., 2004).

Fosil yakıtların aksine, anaerobik sindirimden gelen biyogaz, aslında fotosentez yoluyla güneş enerjisinin yaşayan bir deposu olan biyokütle üzerinde üretildiği için kalıcı olarak yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyogaz sadece bir ülkenin enerji dengesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına ve çevrenin korunmasına da önemli bir katkı sağlar. Biyogaz üretimi ayrıca işlenmemiş hayvan gübresinin gübre olarak depolanması ve kullanımından kaynaklanan metan (CH₄) ve azot oksit (N₂O) emisyonlarını da azaltır. Metanın sera gazı potansiyeli, karbon dioksitten 23 kat ve azot oksitten 296 kat daha yüksektir. Bu nedenle üretilen biyogazın, enerji üretimi ve nakliyesinden fosil yakıtların yerine kullanılması durumunda, CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarında azalma meydana gelecek ve küresel ısınmanın azaltılmasına katkıda bulunacaktır. Ulusal ve bölgesel biyokütle kaynaklarına dayalı olarak biyogaz gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması, ulusal enerji arzının güvenliğini artıracak ve ithal yakıtlara bağımlılığı azaltacaktır. Biyogaz üretiminin temel avantajlarından birisi de, atık malzemeyi anaerobik sindirim için hammadde olarak kullanarak değerli bir kaynağa dönüştürme yeteneğidir. Anaerobik sindirim ayrıca atık hacminin ve atık bertaraf maliyetlerinin azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır. Biyogaz üretimi, anaerobik sindirim hammaddesinin üretimi, toplanması ve taşınması, teknik ekipman üretimi, biyogaz tesislerinin yapımı, işletimi ve bakımı için iş gücü gerektirmektedir. Ulusal biyogaz sektörünün gelişmesi, önemli ekonomik potansiyele sahip yeni işletmelerin kurulmasına katkıda bulunacak, kırsal alanlarda gelirleri arttıracak ve yeni iş imkanları yaratacaktır (Al Seadi vd., 2008).

Anaerobik sindirim sonucu oluşan biyogaz kapalı bir besin ve karbon döngüsü sağlamaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sürdürülebilir biyogaz döngüsü (Al Seadi vd., 2008).

Karbon dengesi, yenilenebilir kaynaklardan enerji sağlayan teknolojilerin çevresel verimliliğini değerlendiren önemli bir göstergedir. Biyogazın yaşam döngüsünün değerlendirilmesinde karbon ayak izi, tesisin yapım ve işletilmesi, hammadde, tesisteki kontrolsüz metan emisyonları, yan ürünlerin tarlada yayılmasında karbondioksit eşdeğerleri dikkate alınmalıdır. Sıvı gübrenin çürütülmesiyle önlenebilecek metan emisyonları, gübre kullanımıyla önlenen karbondioksit emisyonu, biyogazdan elde edilen enerjinin ısı ve elektrik enerjisi olarak kullanılması, enerji dengesini iyileştiren önemli etkenlerdir (Bachmaier vd., 2009).

2.3.1. Biyogaz üretiminde kullanılan biyokütle kaynakları

Biyogaz, anaerobik sindirim yoluyla birçok organik kökenli atık ve artıklardan elde edilebilir. Bu organik kaynakları hayvansal, bitkisel ve kentsel artık ve atıklar olarak gruplandırmak mümkündür. Çizelge 2.4’de hayvansal artık ve yan ürünlerine ait metan üretim potansiyelleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Hayvansal artık ve yan ürünlerine ait metan üretim potansiyelleri (Al Seadi vd., 2013; Sawyerr vd., 2019)

Hammadde	KM (%)	UKM (% KM'de)	Metan verimi (Nm ³ CH ₄ /t UKM)	
			Sınır değeri	Ortalama
Sığır gübresi (sıvı)	6-11	75-82	110-275	210
Sığır gübresi (katı)	20-25	68-76	130-330	250
Tavuk gübresi	20-30	75-85	200-360	280
Domuz gübresi (sıvı)	4-7	75-86	180-360	250
Domuz gübresi (katı)	18-22	75-86	180-360	250
Sığır (mide bağırsak içeriği)	12	80	-	400
Domuz (mide bağırsak içeriği)	12	80	-	460

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilen bitkisel kökenli hammaddeler son yıllarda biyogaz üretiminde kullanılmaya başlamıştır. Bunların başında tahıl tam bitki silajı, mısır, tahıl taneleri, ot silajı, pancar gelmektedir. Bu hammaddelerin bazı özellikleri ve metan verimleri Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Bazı bitkisel kökenli yenilenebilir hammaddelerin metan üretim potansiyelleri (Deublein ve Steinhäuser, 2011)

Hammadde	KM (%)	UKM (% KM'de)	Metan verimi (Nm ³ CH ₄ /t UKM)	
			Sınır değeri	Ortalama
Mısır silajı	28-35	85-98	234-364	340
Tahıl tam bitki silajı	30-35	92-98	290-350	329
Ot silajı	25-50	70-95	300-338	310
Tahıl taneleri	87	97	380	380
Şeker pancarı	23	90	-	350
Şeker pancarı (yemlik)	16	90	-	350

Tarım endüstrisinde işlenen materyallerin yan ürünleri de önemli biyogaz kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bira, alkol, şeker, meyve suyu üretimi gibi tarımsal hammadde kullanarak yapılan üretim sonucunda elde edilen yan ürünler ve biyogaz üretim potansiyelleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Tarım endüstrisinden seçilmiş bazı materyallerin metan üretim potansiyelleri (Akunna, 2019)

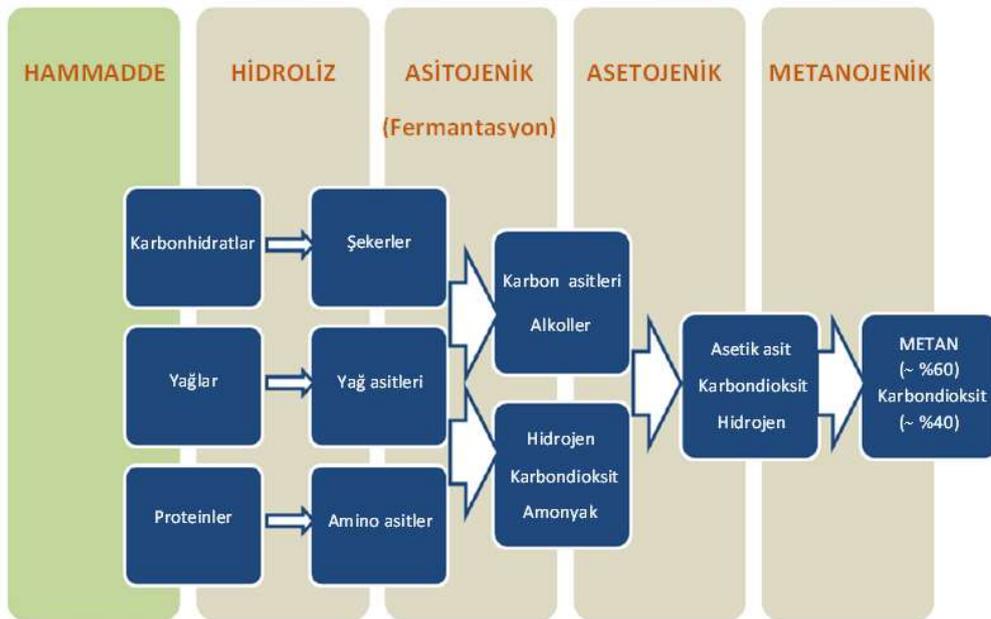
Hammadde	KM (%)	UKM (% KM’de)	Metan verimi (Nm ³ CH ₄ /t UKM)	
			Sınır değer	Ortalama
Bira posası	20-25	70-80	295-443	313
Kolza küspesi	92	87	-	396
Patates posası	6-18	85-96	358-413	336
Melas	80-90	85-90	261-355	308
Elma tortusu	25-45	85-90	445-459	453
Üzüm posası	40-50	80-90	432-466	448
Ham gliserin	100	90	170-200	185
Yağlı tohum artıkları	92	97	540-600	580
Kuru ekmek	65-90	96-98	420-720	620
Karışık yağ	99.9	99.9	-	620
Peynir altı suyu	4-6	80-92	300-540	420
Mezbaha atıkları	-	-	550-1100	825
Kentsel atıklar	-	-	400-500	450
Market atıkları	-	-	500-600	550

2.3.2. Biyogaz Oluşum Evreleri

Anaerobik sindirim süreci 4 aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar Şekil 2.6’da şematik olarak gösterilmiştir. Aşağıda bu aşamalarda gerçekleşen olaylar ve reaksiyonlar sırasıyla anlatılmıştır.

Hidroliz aşaması

Bu aşamada, suda çözünen karmaşık moleküller (büyük protein makromolekülleri, yağlar, selüloz ve nişasta) basit şekerlere, uzun zincirli yağ asitlerine ve aminoasitlere dönüştürülür. Polimerler, monomerlere ve oligomerlere dönüştürülür. Hidroliz, hem fakültatif hem de zorunlu anaerobik bakterilerden salgılanan enzimler tarafından katalize edilmektedir. Hidroliz hızı hammaddenin karmaşıklığına bağlıdır, karbonhidratlar oldukça hızlı dönüşürken, ham selülozik atıklar daha yavaş dönüştürülmektedir (Ostrem vd., 2004). Çizelge 2.7’de hidroliz aşamasında meydana gelen dönüşümler ve bakteriler belirtilmiştir;



Şekil 2.6. Biyogazın oluşum aşamaları (Kayıoğlu, 2017)

Çizelge 2.7. Hidroliz aşamasındaki dönüşümler ve bakteriler (Korres ve Nizami, 2013)

Hammadde	Bakteri	Oluşan ürünler
Nişasta, selüloz, hemiselüloz	<i>Cellulase, cellobiase, zylanase, amylase</i>	Monosakkaritler, şekerler
Yağlar	<i>Lipase</i>	Yağ asitleri, gliserol
Proteinler	<i>Protease</i>	Aminoasitler

Asidojenik aşama

Asidojenik aşamada hidroliz sonucu ortaya çıkan ürünlerin dönüşümü gerçekleşir. Esas fermantasyonun gerçekleştiği aşamadır. Bu nedenle fermantasyon aşaması da denmektedir.

Glikoz gibi karbonhidratlar piruvata indirgenir. Bu ürün, Lactobacillales tarafından laktik aside ve mayalar tarafından etanole dönüştürülür. Koli-aerojenler grubuna ait diğer mikroorganizmalar piruvatları, formik asit, etanol, asetat, asetoin ve butandiole dönüştürür. Monosakkaritlerin dönüşümünde *Propionibacteria* ve *Clostridia* bakterileri önemli rol oynamaktadır.

Yağ asitleri *Acetobacter* tarafından β -oksidasyonu ile parçalanır ve asetatlara dönüştürülür. Aminoasitlerin *Clostridium botulinum* bakterileri tarafından parçalanması sonucunda hidrojen oluşur. Bu esnada CO₂ de açığa çıkmaktadır (Deublein ve Steinhauser, 2011).

Asetojenik aşama

Asidojenik fazında oluşan ürünler bu fazda substrat görevi görürler. Bu aşamada gerçekleşen reaksiyonlar endergonik reaksiyonlardır. Yani reaksiyonların gerçekleşmesi için ek enerjiye gereksinim vardır. Asetojenik fazda, homoasetojenik mikroorganizmalar (örneğin, *Acetobacterium woodii*, *Ruminococcus hidrojenotrophicus*) sürekli olarak ekzergonik olarak H₂ ve CO₂'yi asetik aside (asetat) indirgemektedir. Asetojenik ayrışmanın temel elementleri ve reaksiyonlar Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Asetojenik ayrışmanın temel elementleri ve reaksiyonlar (Deublein ve Steinhauser, 2011).

Kimyasal adı	Kimyasal reaksiyon
CO ₂ , H ₂	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$
Propiyonik asit	$CH_3(CH_2)COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Butirik asit	$CH_3(CH_2)_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 3H_2$
Valerik asit	$CH_3(CH_2)_3COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CH_3CH_2COOH + 2H_2$
Gliserin	$C_3H_8O_3 + H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Laktik asit	$CH_3CHOHCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$
Etanol	$CH_3(CH_2)OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$

Metanojenik aşama

Bu aşamada, metan oluşumu kesinlikle anaerobik koşullar altında (karbonat solunumu) gerçekleşmektedir. Metan asetotropik, hidrojenotropik ve metiltropik bakteriler tarafından oluşturulmaktadır. Metana dönüşen substratlar CO₂, metil ve asetat tipi olmak üzere üç grup altında toplanmaktadır. Bu aşamada gerçekleşen reaksiyonlar Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Metanojenik ayrışmadaki temel reaksiyonlar (Deublein ve Steinhauser, 2011).

Substrat tipi	Kimyasal reaksiyon
CO ₂	$4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$ $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $4HCOO^- + H_2O + H^+ \rightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$
Asetat	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$
Metil	$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + HCO_3^- + H_2O + H^+$ $CH_3OH + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ $CH_3(CH_2)OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$

2.3.3. Biyogaz üretim sistemleri

Biyogaz üretiminde belli başlı üç sistem kullanılmaktadır;

Kesikli (Batch) Fermantasyon

Tesisin fermantörü (üretim tankı) hayvansal ve/veya bitkisel atıklar ile doldurulmakta ve alıkoyma - bekletme süresi kadar bekletilerek biyogazın oluşumu tamamlanmaktadır. Kullanılan organik maddeye ve sistem sıcaklığına bağlı olarak bekleme süresi değişmektedir. Bu süre sonunda tesisin fermantörü (reaktörü) tamamen boşaltılmakta ve yeniden doldurulmaktadır (Anonim, 2017).

Beslemeli-Kesikli Fermantasyon

Burada fermantör başlangıçta belirli oranda organik madde ile doldurulmakta ve geri kalan hacim fermantasyon süresine bölünerek günlük miktarlarla tamamlanmaktadır. Belirli fermantasyon süresi sonunda fermantör tamamen boşaltılarak yeniden doldurulmaktadır (Anonim, 2017).

Sürekli Fermantasyon

Bu fermantasyon biçiminde fermantörden gaz çıkışı başladığında günlük olarak besleme yapılır. Sisteme aktarılan karışım kadar gazı alınmış çökelti sistemden dışarıya alınır. Organik madde fermantöre her gün belirli miktarlarda verilmekte, alıkoyma süresi kadar bekletilmekte ve aynı oranlarda fermente olmuş materyal günlük olarak fermantörden alınmaktadır. Böylece günlük beslemelerle sürekli biyogaz üretimi sağlanmaktadır (Anonim, 2017).

2.3.4. Biyogaz Oluşumunu Etkileyen Faktörler

Biyogaz üretimini etkileyen birçok çevresel ve sistemsel faktör bulunmaktadır. Bu bölümde bu faktörlerin önemli olanları kısaca açıklanacaktır.

Katı madde içeriği

Biyogaz elde edilecek hammadde karıştırılabilecek ve gazın yukarıya çıkmasını, parçacıkların çökmesini engelleyecek kıvamda olmalıdır. Bu nedenle katı madde içeriği hammaddenin özelliğine bağlı olarak %10-25 arasında olacak şekilde seyreltme işlemi uygulanmalıdır (Evans vd., 2015).

C:N oranı

Karbon ve nitrojen oranı biyogaz üretimini etkileyen önemli bir faktördür. İdeal koşullarda bu oranın 16:1 ile 25:1 aralığında olması istenmektedir. Çok düşük C:N oranına sahip substratlar, artan amonyak üretimine ve metan üretiminin engellenmesine yol açar. Çok yüksek bir C:N oranı ise, nitrojen eksikliği, protein oluşumu ve dolayısıyla mikroorganizmaların enerji ve yapısal malzeme metabolizması için olumsuz sonuçlara sahip olduğu anlamına gelmektedir (Deublein ve Steinhauser, 2011). Organik kökenli bazı hammaddelerin C:N oranları Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Bazı organik kökenli hammaddelerin C:N oranları (Korres ve Nizami, 2013)

Materyal	C:N
Sıvı sığır gübresi	6-24
Sıvı domuz gübresi	3-18
Tavuk gübresi	3-10
Keçi-koyun gübresi	12-19
Mısır sapı	60
Çeltik ve buğday sapı	70
Tam tahıl	20-24
Patates	44
Ot silajı	10-25
Yapraklar	30-80
Meyve atıkları	7-35
Besin atıkları	15-32
İnsan dışkısı	8

Sıcaklık

Reaktör içindeki çalışma sıcaklığı veya değişimi, metan ve uçucu asit oluşturan bakterileri büyük ölçüde etkilediğinden, biyogaz üretim sürecinde önemli bir role sahiptir (Gerardi, 2003). Sakrofilik bakteriler 12-30 °C, mezofilik bakteriler 30-40 °C tercihen 35 °C, termofilik bakteriler ise 50-60 °C tercihen 55 °C sıcaklıklarda maksimum verimle çalışmaktadırlar (Song

vd., 2010; Nges ve Liu, 2010). Birçok biyogaz tesisi mezofilik sıcaklık aralıklarında çalışmaktadır. Termofilik sıcaklık aralığında reaksiyon ve metabolik büyüme oranları artmakta, hammadde daha yüksek oranda sindirilerek verim artışı sağlanmaktadır, ancak reaktörün içindeki sıcaklığın artırılması için ek enerjiye gereksinim duyulduğundan ve işletme maliyetini arttırdığından fazla tercih edilmemektedir (Ge vd., 2016).

pH

pH anaerobik sindirimin tüm aşamalarında anaerob bakterilerin gelişmesini etkilediği için önemli bir parametredir. Biyokimya açısından, hammadde parçalanmasının erken aşamaları asidik bir ortam gerektirirken, daha sonraki aşamalarda, metan gerçekten üretildiğinde, nötr bir pH ortamı avantajlıdır. Bu nedenle, hidroliz ve asidojenik aşamaları için pH değeri 4,0 ile 6,5 arasında, metanojenik aşamasında ise 7,0 civarında olmalıdır (Kim vd., 2003). Metanojenik aşamada PH değeri 6,5'in altına düşerse, hidrolitik bakteriler tarafından organik asitlerin üretimi pH'da daha fazla düşüşe ve muhtemelen fermantasyonun durmasına yol açar. pH değeri 10'un üzerine çıkarsa bakterilerin aktiviteleri geri dönülmez bir şekilde kaybolur (Deublein ve Steinhauser, 2011). Anaerobik sindirimde maksimum biyogaz verimi elde etmek için optimum pH aralığı 6,5-7,5 olmasına rağmen, bitkisel kökenli hammaddelerde bu aralık nispeten daha geniştir ve optimum pH değeri substrat ve sindirim tekniğine göre değişmektedir (Liu vd., 2008). Prosese çok kısa bir sürede çok fazla organik malzeme eklendiğinde ya da metan oluşumu başka bir nedenden ötürü engellendiği takdirde, fermantasyonun asitli metabolizma ürünleri zenginleşir. Normal şartlarda pH değeri nötral alandaki karbonat ve amonyak tarafından ayarlanır. Sistemin tamponlama kapasitesi dolduğunda, yani çok fazla organik asit oluştuğunda, sistemin pH değeri düşer. Bu nedenle biyogaz üretimi sırasında pH değeri sürekli kontrol edilmelidir.

Organik yükleme oranı

Organik yükleme oranı, reaktörün boyutunu planlamak için kullanılan ana parametrelerden birisidir. Optimum değeri, hammaddenin cinsine ve reaktörün çalışma sıcaklığına bağlıdır (Romano ve Zhang, 2008). Sistemin tolere edebileceği uçucu katı maddelerin miktarını belirlemektedir. Aşırı yükleme olduğu zaman karıştırma etkinliği azalır, uçucu yağ asitleri artar ve bunun sonucunda pH düşer (Evans vd., 2015).

Hidrolik bekleme zamanı

Organik materyalin (substrat) ve mikroorganizmaların (katıların) sindiriminde istenen bozunmayı elde etmek için gereken süredir. Reaktörün boyutunu belirlemek için organik yükleme oranıyla birlikte önemli bir parametredir. Hidrolik bekleme zamanı bakteriyel büyüme ve daha sonra organik materyalin gaza dönüşümü için mevcut olan süreyi belirlediği için önemlidir. Kısa tutulma sürelerinde bakteri popülasyonu yok olma tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadır, fazla süre ise daha büyük reaktör hacmi ve maliyet gerektirmektedir (Yadvika vd., 2004).

Toksosite

Mineral iyonlar, özellikle ağır metaller ve deterjanlar, normal bakteri büyümesini engeller. Sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, amonyak ve kükürt gibi küçük miktarlarda mineraller bakteriyel büyümeyi uyarır ancak daha yüksek konsantrasyonlar toksiktir. Bakır, nikel, kobalt, krom, çinko ve kurşun gibi ağır metaller çok küçük miktarlarda bakteri büyümesi için gereklidir, ancak daha yüksek miktarlarda toksiktir ve sindirimin gübre olarak kullanılmasını engeller. Deterjanlar (sabun), antibiyotikler ve organik çözücüler bakterileri engeller. Toksik inhibisyonu takiben geri kazanım, yalnızca durdurulup yıkanarak veya içeriği toksik seviyenin altına çekmek için seyreltilerek sağlanabilmektedir. Ağır metallerden $Cu > 50$ mg/l, $Zn > 150$ mg/l ve $Cr > 100$ mg/l olduğunda bakteri faaliyetlerini engelleyici etkileri artmaktadır (Evans ve ark. 2015).

Karıştırma/çalkalama

Reaktör içerisinde homojen dağılımı sağlamak ve stabiliteyi sağlamak açısından önemlidir. Karıştırma işlemi yeterince yapılmadığında sindirilmemiş materyal oranı artar ve gaz verimi düşer.

3. KAYNAK ÖZETLERİ

Gelecekteki enerji yatırımlarının etkin bir şekilde yönetilebilmesi için, öngörülen enerji sektörü büyüme senaryolarının çevresel ayak izlerinden kaynaklı problemlerin, sürdürülebilir enerji üretimi uygulamalarına odaklanarak çözülmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji üretim birim maliyetleri, teknolojik gelişmelerle bağlantılı olarak zamanla azalmaktadır. Sürdürülebilirliğin sağlanması açısından yenilenebilir enerji kullanımı oldukça önemlidir ancak enerji verimliliği ve enerji tasarrufunun sağlanması ile ilgili teşvikler ve toplumsal bilinçlendirme çalışmaları da önemli bir etken olarak değerlendirilebilir. En önemli alt kriterlerden biri olarak CO₂ salımının görüldüğü, düşük karbon emisyonlu enerji üretiminin teşvik edilmemesi ile ilgili finansal destek mekanizmalarının genişletilmesi konusunda çalışmaların genişletilmesi gerektiği düşünülmektedir (Morsünbül Parmaksız, 2020).

Karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji ihracatına olan bağımlılığımızı azaltmak için en uygun senaryo, yenilenebilir enerji teknolojilerine odaklanmak olacaktır. Bu nedenle geleceğin enerji sistemlerini oluştururken yenilenebilir kaynaklara odaklanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Son değerlendirme 2023 senaryosunda kişi başına CO₂ emisyonunun çok yüksek olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kapasitesi ve nükleer enerjinin devreye girmesine rağmen, nüfus ve enerji yoğunluğundaki artış sera gazı emisyonlarına bağlanabilir. Bu durumun üstesinden gelmek için enerjiyi verimli kullanmak, enerji yoğunluğunu azaltmak ve yenilenebilir kaynaklara daha fazla yatırım yapmak gerekmektedir. Farklı enerji kaynakları arayışı günümüzde sürdürülebilir enerji sağlamaya başlamıştır. Türkiye'nin tüm yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma imkanına sahip olduğu coğrafi konumu ve jeopolitik yapısı nedeniyle 2053 enerji sistemi için planlanan birçok senaryo ancak yenilenebilir enerji kullanımının yüksek bir payına dayalı senaryo olmaktadır (Bölen Türkmen, 2019).

Biyokütle, biyolojik olarak elde edilebilecek enerji potansiyeline sahip olan bir enerji kaynağıdır. Dünyamızın enerji kaynaklarının kullanımının %86'lık kısmını petrol, kömür ve doğal gaz oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kullanım oranı yaklaşık %2,7' dir. Bu %86'lık kısım tükenmekte olan enerji rezervlerinden oluşmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları iyice değerlendirilmeli ve bu enerji kaynaklarının kullanımı artırılmalıdır. Biyogaz yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki büyük öneme sahip bir enerji kaynağıdır. Ülkemiz biyogaz üretimi için oldukça fazla biyokütle kaynaklarına sahiptir. Biyogaz enerjisinin diğer enerji kaynaklarından farkı ortaya çıkardığı karbondioksitin doğaya zarar vermeden bitkilerin

kullandığı karbondioksite eşit olmasıdır. Biyogaz üretimi organik madde ve bazı minerallerin geri kazanılmasını sağlaması açısından avantajlıdır. Ayrıca atıkların bertaraf edilmesi, enerji kazanılması ve organik gübre elde edilmesi açısından önem kazanmaktadır. Bu kaynakların çoğu enerjiye dönüştürülerek yeterince değerlendirilmemekte ve bu yüzden de çevre kirliliği oluşturmaktadır. Ülkemizde oluşturulacak olan biyogaz tesisleri, temiz enerji üretiminin yanında Türkiye'nin enerji açısından dışa bağımlılığını azaltacak ve ekonomiye katkı sağlayacaktır. Organik maddelerin anaerobik mikro organizmalar vasıtasıyla uygun doğa şartlarında çürümesi sonucu her yıl 590-880 milyon ton metan gazı atmosfere atılmaktadır. Atmosfere salınan metan gazının %90'nın biyojenik kaynaklar oluşturur. Geriye kalanlar fosil yakıtlardan kaynaklanmaktadır. Kuzey yarım kürede atmosferdeki metan konsantrasyonu takriben 1,65 ppm dir. Metan gazı karbon dioksite göre 21 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir. Metan gazının yeryüzündeki sera etkisi %15' dir (Şenol vd., 2017b).

Yenilenebilir enerji kaynakları, küresel enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıtlardan kaynaklı çevresel endişelerin artması sebebiyle kaydadeğer bir dikkat kazanmıştır. Anaerobik çürütme yenilenebilir enerji teknolojilerinden bir olup çeşitli biyokütlelerden gaz enerjisi üretmeye olanak sağlamaktadır. Mikroalgler, anaerobik çürütme için güzel bir adaydırlar, fakat sert hücre duvarı yapısına sahip mikroalgler anaerobik bakterinin mikroalg biyokütlesini parçalamasını engellemekte ve metan üretiminde limitleyici olmaktadır. Mikroalglerden metan üretimini geliştirmek için, ön artım yöntemlerinin anaerobik çürütme öncesinde uygulanması, sert hücre duvarı yapısının parçalanmasını ve biyokütle çözünürlüğünün artmasını sağlamaktadır (Çakmak, 2019).

Mikroalgal biyogaz üretmek için en son teknolojiye ulaşmak için gerçek dünya araştırmaları ve geliştirmeleri gereklidir. Bu bağlamda, bu biyoprosesin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini iyileştirme girişimleri olarak onlarca yıldan beri kapsamlı araştırma çabaları sarf edilmiştir. Biyokütle üretiminde yüksek maliyetler ve yetiştirmede, biyokütle üretim aşamalarının enerji verimsizliği ve hasat başlıca sıkıntılar olarak kabul edilir. Mikroalgal biyogaz üretimi sürdürülebilir bir yaklaşıma ulaşmak için, bu engellerin, uygun maliyetli hasat teknolojilerinin geliştirilmesi, yetiştirme ve hasat koşullarının optimizasyonu gerekmektedir. Teknik olarak sağlam ve ekonomik olarak uygulanabilir sindirim sisteminin kurulması gerekmektedir. Anaerobik sindirim, tek aşamalı ve iki aşamalı anaerobik sindirim, sıvı ve katı anaerobik sindirim ve termofilik ve mezofilik anaerobik sindirim dahil olmak üzere çeşitli stratejilerle yapılabilen biyogaz üretiminde temel adımdır. Bu stratejilerin her birinin kendine

özgü avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen, mikroalgleri herhangi bir bileşim ve yüksek çıktı ile kullanmak için en son teknoloji henüz geliştirilmemiştir. Sonunda, sorunsuz ve uygun maliyetli anaerobik sindirim için reaktörlerin veya sindiricilerin geliştirilmesi, ileri araştırma çabalarında öncelik kazanmalıdır. Anaerobik sindirim için uygun teknik ve ekonomik verilerle kararlı ve güvenilir reaktörler tasarlamak, mikroalgal biyogaz üretimi için potansiyel barındırabilir (Zabed vd., 2020).

Alg biyokütlesinin sıvı ve gaz halindeki biyoyakıt kaynağı olarak, yüksek enerji potansiyeline sahip yaşayabilir bir su enerjisi mahsulü olma potansiyeline sahip olduğunu, bununla birlikte, ne mikroalg ne de deniz yosunu, yüksek hasat, konsantre ve kurutma maliyetleri nedeniyle şu anda yalnızca enerji amaçlı yetiştirilmemektedir. Alg biyokütlesinin anaerobik sindirimi, işlem den önce ıslak biyokütlenin kurutulmasıyla ilişkili maliyetleri teorik olarak azaltılabileceğini maliyetleri düşürmek ve net enerji dengesini artırmak için yeni işleme yöntemlerine ihtiyaç olduğu ortaya konulmuştur. Alg biyokütlesi, Anaerobik sindirim yöntemleri kullanılarak işlendiğinde biyometan üretimi için potansiyel bir yeşil biyoenerji kaynağıdır (Milledge vd., 2019).

Sürekli bir biyogaz üretimini gerçekleştirmek, düzenli sıcaklık kontrolü için biyoreaktöre sık aralıklarla, besleme yapmak gerekir. Beslemenin artması organik maddenin parçalanmasını artırmaktadır. Çünkü sürekli bir biyogaz üretimini gerçekleştirmek için biyoreaktördeki substrat-su oranının sabit tutulması halinde mikroorganizmaların biyogaz üretimi için tüketeceği organik madde miktarı azalmamış olur ve böylece daha çok gaz üretimi gerçekleşir (Çeken, 1997).

Biyogaz üretimi için kullanılan substratın katı madde içeriğindeki belirli seviyeden sonraki artışlar, metanojen bakterilerin aktivitesini kademeli olarak yavaşlatabilir ve sonuç olarak biyogazın üretim verimi düşebilir (Kossmann ve Pönitz, 1999). Biyogaz tesislerinde biyokütle olarak bilinen katı madde içeriğinin %7-12 değerinde olması gerekmektedir (Demir, 1993). Anaerobik fermantasyon sistemlerinde maksimum biyogaz üretim verimi reaktöre verilen hammaddedeki katı maddenin kütlece %6 ile %10 arasında olduğunda gerçekleştiği ve metan üretim veriminin, kütlece %12 katı madde oranının aşılması durumunda ise düştüğü görülmektedir. Anaerobik parçalanma biyoreaktöründeki su karışımı az, katı madde oranı fazla ise mikroorganizma içeriğindeki büyüme azalmasından ve karıştırma için gerekli enerji ihtiyacı artışından dolayı gaz verimi düşmektedir. Biyogaz üretimindeki substratın ayrıca katı madde oranının çok az olması ve su miktarının fazla olması ise yine mikroorganizmalar için uygunsuz

koşulların oluşmasına yol açar. Böylelikle biyogaz oluşumu yine olumsuz etkilenir (Ardıç ve Taner, 2004; Şenol vd., 2017a)

Hidrolik bekleme süresi (HBS), gübre içindeki organik maddelerin (substratın) bakteriler tarafından çürütülmesi sonucu biyogaz üretmesi için gerekli olan süre olarak tanımlanabilir. Reaktör içindeki bazı organik maddeler(substratlar) tam olarak biyokimyasal reaksiyona girdiğinde zamanla gaz üretimi azalmaya başlamaktadır. Belirlenen hidrolik bekleme süresi içinde substrat olarak kullanılan organik maddelerin %70-80 oranında biyokimyasal reaksiyona girerek yok olduğu varsayılır. Biyogaz tesislerindeki HBS, işletme sıcaklığına bağlı olarak 20-120 günler arasında değişmektedir. Tropikal kısımlarda HBS nin 40 ila 50 gün arasında olduğu bilinmektedir. Örneğin Çin'in soğuk bölgelerinde bu süre yaklaşık 100 gün olduğu bilinmektedir (Öztürk, 2005; Şenol vd., 2017a)

Anaerobik parçalanma (oksijensiz fermantasyon) sırasında uygun olabildiğince organik yükleme hızı sabit alınmalıdır. Organik yükleme hızı fazla ise reaktörde uçucu yağ asitleri birikir ve pH azalır. pH'ın azalması metan oluşturan bakterilerin faaliyetini aksi yönde etkilemektedir. Bu olay da biyogaz üretim hızını olumsuz yönde etkiler. Aynı şekilde organik besleme hızı azaldığı zaman biyogaz üretim hızı da olumsuz etkilenir (Öztürk, 2005).

Biyogaz reaktörünün verimi öncelikle reaktördeki organik maddelerin kalma zamanından, hayatta kalabilecek durumda olan metanojen bakteriler ve biyoreaktöre giren organik maddelerin birbirlerine olan temasından etkilenmektedir. Fermantasyon ile verimli bir gaz karışımı üretmek için, biyogaz reaktöründeki karıştırmanın yararı araştırmacılar tarafından bahsedilmiştir. Anaerobik biyoreaktör içerisindeki organik maddelerin karıştırılması ile mikroorganizmalar eşit şekilde dağılmaktadır. Karıştırma işlemi ayrıca organik maddelerin partikül büyüklüğünü azaltmaktadır. Böylece ön işlem etkisine ve karışımdan biyogazın serbest kalmasına yardımcı olmaktadır (Casey, 1986; Lee vd., 1995; Şenol vd., 2017a).

Organik atık maddeler, oksijensiz fermantasyon tankında üreyen farklı mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir. C/N oranı bu mikroorganizmalar için gerekli uygun ortam koşullarının sağlanmasında çok önemli bir yere sahiptir. C/N oranı 23'den büyük olduğunda çürüme yavaşlar. Aynı şekilde bu oran 10'dan küçük olması durumunda da çürüme yavaşlamaktadır. Bu nedenle biyogaz üretimi için optimum C/N oranı 10-23 değerleri arasında olmalıdır (Öztürk, 2005; Şenol vd., 2017a).

Üretilen biyogazın fazla miktarda oluşumu, biyoreaktörde köpük tabakasının oluşması kaçınılmazdır. Bu köpük oluşumu, işletmeye alınan gaz çıkışının fazla olması veya organik yükteki ani artışlardan da olabilmektedir. Köpük oluşumu, HBS nin yükselmesiyle ya da sıcaklığın yükselmesiyle azaltılabilir. Yağ asitleri gideriminin geliştirilmesiyle birlikte köpük oluşumunun düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca pH'ın düşmesiyle de köpük oluşumu yükselmektedir. Köpük oluşumu HBS nin 10 günden az olduğunda da yaşanır. Bu köpük tabakasını yok etmek için mekanik karıştırma veya su püskürtme gibi çözüm önerileri geliştirilmiştir (Yıldız vd., 2010; Şenol vd., 2017a).

Mineral iyonlar, ağır metaller ve deterjanlar biyoreaktörde oksijensiz fermantasyon sonucu mikroorganizmalar üzerinde toksik etki yaparlar. Mineral iyonlar (potasyum, sodyum magnezyum, kalsiyum, amonyum ve kükürt gibi maddeler) mikroorganizmaların gelişmesini artırır. Fakat ağır metaller toksik etki yapabilirler. Örneğin 50-200 mg/l amonyum mikroorganizmalarının gelişmesini sağlar fakat 1500 mg/l amonyum mikroorganizmalar üzerinde zıt etki yapabilmektedir (Öztürk, 2005).

Organik atıklardan oksijensiz fermantasyon sonucu ile üretilen biyogaz saf metan içeriğine sahip olmadığı için biyogazın kullanım amacına saflaştırılması gerekmektedir. Biyogazın içerisinde saflığını azaltan en büyük bileşen CO₂ dir. Biyogaz karışımı içerisindeki bu bileşen ne kadar çok ayrıştırılırsa biyogazın enerji değeri o kadar çok artmaktadır. Başlıca CO₂ adsorplama yöntemleri olarak; sudan geçirme, polietilen glikol ile adsorplama, karbon moleküler elek kullanma ve membran ayırma olarak bilinmektedir. Küçük işletmeli tesislerde ise en basit yöntem oluşan biyogazı doğrudan sudan geçirmektir. Su ile biyogazın içeriğindeki metan oranı %90'na kadar çıkmaktadır. Suya tutunan CO₂ kuru buz üretiminde ve seralarda kullanılabilir. CO₂ biyogazın verimini düşürdüğü gibi H₂S de biyogaz üretim proseslerin de korozyona sebep olmakta ve arıtılması gerekmektedir. Başlıca H₂S arıtım yöntemleri olarak; polietilen glikol ile ayrıştırma, su ile ayrıştırma, biyogaz reaktörüne demir klorür veya hava ilavesi ve aktif karbon kullanılmasıdır. Biyogaz reaktörüne hava ya da oksijen ilave ederek hava ile biyogaz içeriğinde oluşan H₂S reaksiyona girerek Hidrojen Sülfat oluştururlar. Bu hidrojen sülfat reaktörden fermente gübre ile birlikte alınmaktadır. Bu yöntemle biyogaz içeriğinde istenmeyen gaz olan H₂S konsantrasyonun da yaklaşık %95'e varan azalma gözlenmektedir. Bu yöntemle kullanılan havanın içeriği ise en fazla %6 olmalıdır. Biyogaz reaktörünün içerisine demir klorür eklenmesi ile H₂S ile demir klorür reaksiyona girmekte ve demir sülfat oluşturmaktadır (McNamara vd., 2008). Bir diğer H₂S ayrıştırma yöntemi olan yöntem ise aktif

karbon içerisinde ham biyogazın geçirilmesidir. Bu yöntem aslında doğrudan arıtım yöntemi değildir. Biyogaz reaktörü içerisine gönderilen havanın H_2S ile reaksiyona girerek kükürt ve su oluşturmaktadır. Aktif karbon sayesinde oluşan kükürt adsorbe edilir ve reaktörden ayrılmaktadır (IEA Bioenergy, 2005; Şenol vd., 2017a).

Reaktörde oluşan biyogaz neme doymuş haldedir ve biyogaz proseslerin de depolama alanına giden biyogaz yanında nemi de beraberinde götürmektedir. Depolanan biyogaz içeriğindeki nem biyogazın enerjisini düşürmesi ve gazın sıkıştırılması esnasında nemin gaz ventilerine sıkışması gibi problemlere sebep olmaktadır. Bu nedenle biyogaz içeriğindeki nem miktarının giderilmesi gerekmektedir. Biyogazın içeriğinde nem olması yakıldığında kırmızımsı renkte alev çıkmasından anlaşılabilmektedir (Walsh vd., 1989). Biyogaz içerisindeki nemin giderilmesi için su adsorplayıcı katı veya sıvılar kullanılabilmektedir. Ayrıca adsorpsiyon kulelerinde suyu seven tuzlar, metal oksitler veya glikol gibi bileşenler sayesinde biyogaz içeriğindeki nem giderilebilmektedir (Şenol vd., 2017a).

Biyogaz, organik kökenli atıkların enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması, ekonomiye olan katkısı, atık bertarafında daha hijyenik şartlar sağlanması açısından olumlu özelliklere sahiptir. Ancak, biyogaz tesislerinde oluşacak olumsuz koşullar nedeniyle iş güvenliği riskinin oluşması, su tüketiminin fazla olması, tesisin işletilmesi için gerekli teknik bilgi ve becerinin yetersiz olması, tesis kontrolünün zor olması, fermantasyon sonucu oluşan atıkların değerlendirilmesindeki güçlükler olumsuz yanlar olarak sayılabilir (Sabuncu, 2010).

Rafael Ramírez-Arpide vd. (2018) olumsuz olan iklim koşullarında büyümeyebilen hint inciri ile sera gazı emisyon kaynağı olan süt ineği gübresini aneorobik fermantasyon yoluyla biyogaz üretimi için kullanmışlardır. Çalışmada, hint inciri ve süt ineği gübresinin birlikte sindiriminin çevresel etkilerini ve enerji dengesini değerlendirmişlerdir. 10-L anaerobik sindirim sisteminde biyogaz üretimi ve verim verileri elde etmişlerdir. Sonuçlar, biyogaz üretimi için yatırımın geri dönüşünün 8,1'den 12,4'e kadar değiştiğini göstermiştir. Sistemin küresel ısınma potansiyeli kategorisinde çevresel etkiyi %22,5 oranında düşürürken, asitleme potansiyeli ve ötrofikasyon potansiyel etki kategorisi değerlerini sırasıyla %47,2 ve %45 oranında artırmıştır. Reaktör tankını kaplamanın ise küresel ısınma potansiyelinde %2,3'lük bir azalmaya yol açtığını bulmuşlardır. Bu sonuçlara dayanarak, hint inciri ve süt ineği gübresinden elde edilen biyogaz üretimi ve sindirim sistemi yönetimi, küresel ısınma potansiyeli benzer

hammadeler için bildirilenden daha düşük bir değere sahip olduğundan daha temiz enerji üretimi sağladığını belirtmişlerdir.

Ertem vd. (2017) Yapılan bu çalışmada, biyokütlenin enerji mahsullerinin deniz makroalg ile ikame etmişler ve potansiyel çevresel etki kategorileri olan küresel ısınma, asitleme, ötrofikasyon ve arazi dönüşüm potansiyeli değerlendirmişlerdir. Endüstriyel ölçekte biyogaz tesisi mısır (%27), çim (%54), çavdar (%8) ve tavuk gübresi (%11) birlikte karışımı ile çalışmakta ve 500 kWh enerji üretmektedir. Çalışmada ise hammadde olarak kahverengi (%20) ve kırmızı alg (%80) karışımı kullanılmıştır. Sonuçlarda, alg gübresinin tavuk gübresi ile karışımında emisyon azaltımları üzerindeki olumlu etkilerini bulmuşlardır. 1 MJ enerji üretimi için sırasıyla %52, %83, %41 ve %8 daha düşük küresel ısınma, asitleme, ötrofikasyon ve arazi dönüşüm potansiyelleri, dahası, besleme stoğunun kg'ı başına %84 ve %6 daha düşük asitleştirme ve arazi dönüştürme potansiyeli olduğunu belirtmişlerdir. Tavuk gübresi (%40) ve makroalgenin (%60) birlikte sindirimi ile sürdürülebilir enerji üretiminin mümkün olduğunu göstermektedirler. Biyogaz üretim amaçları için kostal hatlardan alg biyokütlesinin toplanması, karasal ürün üretiminin neden olduğu toplam tarım arazisi etkilerini önemli ölçüde azaltacağını ifade etmişlerdir.

Nandi vd. (2017) inek gübresinin anaerobik fermantasyon üzerine karıştırmanın etkisini, 35 °C'de laboratuvar ölçekli deneylerde değerlendirilmişlerdir. . Üç adet laboratuvar ölçekli sürekli karıştırılmalı tank reaktöründe sürekli karıştırma (100 dak. Dakikada 15 dak.) ve metan üretimi üzerine etkisi araştırmışlardır. Gaz üretimi ve kompozisyon ölçümlerine ek olarak, reaktör içeriğine periyodik olarak çeşitli analizler yapılmıştır. Karıştırıcısız reaktör ve ortam koşullarına kıyasla, biyogaz üretimi, karıştırıcılı reaktörde sırasıyla %2,20 ve %18,85 oranında artmıştır. Karıştırıcılı reaktördeki metan üretimi, karıştırma ve ortam koşullarına göre %3,21 ve %18,23 oranında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Karıştırmanın kimyasal ve mikrobiyal düzeyde ve anaerobik sindirimin farklı aşamalarında etkilerini vurgulamışlardır. Reaktörün uzun süreli çalışmasında, kabuk oluşumu yaygın bir problem oğlunu ve kabuk oluşumunun, etkin reaktör çalışması ve biyogaz oluşumunu engellediğini, reaktöre eklenen karıştırıcının, bu gibi sorunları çözmek için uygun bir yaklaşım olabileceğini söylemişlerdir.

Tınmaz Köse (2017), çalışma kapsamında, Trakya Bölgesi'nde hayvan gübrelereinden oluşabilecek biyogaz potansiyelinin ortaya koymuş ve haritalandırılması amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'ndan temin edilen büyükbaş, küçükbaş, ve kümes hayvanları sayılarına ait veriler baz alınarak hayvan gübrelereinden elde

edilebilecek biyogaz (metan) miktarları hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplanan biyogaz miktarlarının enerji değerleri değerlendirilmiştir. TÜİK verilerine göre Trakya Bölgesi'ndeki 2015 yılına ait hayvan sayıları; büyükbaş için 443.057 adet, küçükbaş için 1.033.578 adet ve kümes hayvanları için 1.445.380 adet olarak belirlenmiştir. Biyogazın %60 metan içeriğine sahip olması durumunda enerji değerinin 22,7 MJ/m³ ve buna bağlı olarak 1 m³ metan gazının enerji değerinin 36 MJ olacağı kabulü ile hayvan gübresinden elde edilecek biyogazın enerji değeri hesaplanmıştır. Bu değerler baz alındığında hayvan gübrelerinden üretilebilecek biyogazın enerji eşdeğer 2.427,81 TJ/yıl olarak hesaplanmıştır.

Zhang vd. (2016), yüksek biyogaz verimi elde etmek ve sindirim performansının daha iyi anlaşılması için karbonun azot (C / N) oranının sindirim üzerindeki etkisini daha iyi açıklamak amacıyla yaptıkları bu çalışmada yüksek enerji potansiyeline ve yüksek C / N oranına sahip olan sorgum gövdesinin üre ilavesiyle C / N oranı üre ile 25'e ayarlandığında, biyogaz verimi 413 ml / g VS, ham sorgum sapından %26 daha yükseldiğini, 25 C / N oranı ile, sorgum sapı ve inek gübresi sindirimi 478 ml / g VS'nin en yüksek biyogaz verimini oluşturduğunu belirtmişlerdir. Fermantasyonun, stabil pH değerine ve yüksek sindirim verimliliğine olanak sağladı ve aşırı asitleşmenin olmadığını, fermantasyon ile biyogaz üretimi üzerindeki iyileşmenin kısmen düzeltilmiş C / N oranına bağlandığını ve Fe, Ni, Zn, Ca, vb. gibi inek gübrelerindeki eser elementler de biyogaz üretimindeki artışa katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Montingelli vd. (2015) biyogaz üretimi için hammadde olarak alg biyokütlesi üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Yosun türevli biyoyakıtları, iklim değişikliğini hafifletmek ve fosil yakıtların ve petrol rezervlerinin hızla tüketilmesine alternatif olarak en umut verici çözümlerden biri olarak görmüşlerdir. Mikroalg ve makroalg, biyokütle kaynaklarının birinci ve ikinci kuşakları ile ilgili dezavantajların üstesinden gelme yetenekleri sayesinde yoğun bir akademik ve endüstriyel araştırma geçirdiğini, alglerin başlıca avantajlarının: ekilebilir araziler için gıda ürünleri ile rekabet, yüksek büyüme oranları, düşük lignin fraksiyonları, yoğun enerji ön-işlem ihtiyacını ve biyo-rafineri yaklaşımı ile uyumu azalttığı ileri sürmüşlerdir. Makroalglerden türetilen biyogazda yüksek düzeyde H₂S mevcut olduğu için, tüm sistemin bir arıtma işlemi uygulayabilmesinin yararlı olacağını söylemişlerdir.

Ayhan (2013), çalışmada biyogaz üretiminde süt sığırları gübresi ve mısır silajını farklı karışım oranlarında kullanarak elde edilecek biyogaz miktarlarının ve biyogaz üretimi açısından en uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla denemeler gerçekleştirilmiştir.

Yüksek kaliteli hammaddenin temini optimum gaz verimi elde etmek için vazgeçilmez bir ön koşul olduğunu, süt sığırı gübresinin tek başına anaerobik fermantasyonu yerine mısır silajının eklenmesi ile gaz veriminin arttığını saptamıştır. Böylelikle biyogaz üretiminde konvansiyonel anaerobik fermantasyon yerine, organik maddelerin birlikte fermantasyonu tekniğinin (ko-fermantasyon) uygulanması ile anaerobik fermantasyonda değişik materyallerin kullanılmasını sağlayarak, fermantasyon hammaddelerini çeşitlendirecek ve verimliliği arttıracığını belirlemiştir.

Arıcı (2009), yüksek lisans tezinde, farklı tarımsal atıkların, aynı sıcaklık koşullarındaki anaerobik fermantasyon performanslarını incelemiştir. Sığır, tavuk, koyun, keçi atığı ile silaj, çim ve biyodizel üretim prosesi artığı olan gliserinden oluşan atıkların farklı konsantrasyonlardaki karışımlarının ürettiği biyogaz, kesikli reaktörlerde ve 37 °C’de, 69 gün boyunca takip edilmiştir. Yaklaşık olarak katı madde oranlarının %10 olduğu reaktörlerde, en yüksek metan verimi, 325 ml CH₄/gUK değeri ile %50 sığır atığı ve %50 silaj karışımından elde edilmiştir. En fazla biyogaz verimi ise 560 ml biyogaz/gUK değeri ile %50 sığır, %25 koyun ve %25 silaj karışımından elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek KOİ giderimi %51,12 oranı ile sığır atığı ve silaj karışımından elde edilmiştir. Gliserin, sığır atığı ve silaj karışımından oluşan reaktörlerde fermente sığır atığı eklenmesi ve pH ayarlaması yapılmasına rağmen biyogaz üretimi gözlenmemiştir. Sonuç olarak tüm reaktörlerde, ürettikleri biyogaz ile orantılı bir şekilde toplam karbonhidrat, toplam katı, uçucu katı ve KOİ değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. En fazla uçucu katı giderimi, %50 sığır ve %50 tavuk atığı karışımında %40 olarak gerçekleştiği bildirilmiştir.

Durmuş (2009), yüksek lisans tezinde kurulan biyogaz sistemi, mekanik karıştırıcılı besleme materyali ön hazırlama tankı, biyogaz reaktörü, biyogaz depolama tankı ve fermante gübre boşaltma tanklarından oluşmaktadır. Biyogaz reaktörü 1,2 m³ hacimli (çalışma hacmi 1 m³), çift cidarlı, mekanik ve hidrolik karıştırılmalı, mekanik köpük kırıcı, silindirik dik tiptir. Reaktörde, pH kontrolü ve tamponlama süresinin ölçümü, yükleme-boşaltma ve sıcaklık denemeleri yapılmıştır. Denemelerde PLC ile on/off kontrol yöntemi uygulanmış, SCADA sistemi ile sensörler, elektro-valfler, pompa ve motorlar izlenmiş, kontrol edilmiş ve veriler kaydedilmiştir. Farklı atık miktarlarında yükleme-boşaltma denemeleri yapılarak, sistemin hassasiyeti ölçülmüş ve iletim organlarında oluşan arızaların nedenleri araştırılmıştır. Yükleme ve boşaltma miktarlarının set noktasında görülen aşımaları, SCADA yazılımında pompanın çalışma durma zamanı ayarlanarak giderilebileceği görülmüştür. Reaktörün pH seviyesi (pH

başlangıç değeri =7,78) 1 molar NaOH çözeltisi ile pH =8,2 seviyesine çıkarılarak, sistemin bu sürede verdiği tepki izlenmiştir. İstenilen pH değerine 11,3 saat sonra ulaştığı bildirilmiştir. Sıcaklık denemeleri iki ayrı şekilde gerçekleştirilmiştir. Birinci grupta, yüklemboşaltmanın, ikinci grupta ise yalnızca düzenli karıştırmanın reaktör sıcaklık dengesine olan etkileri izlenmiştir. Yapılan denemelerde, eğer reaktör ve ısı iletim elemanları yeterince iyi yalıtılırsa ve sistemdeki uzun süreli arızalar önlenbilirse, on/off yöntemle yapılan kontrolün, sıcaklığın set değerinde küçük salınımlarla dengede kalmasında başarılı olacağı bildirilmiştir.

Fernandez vd. (2008), yaptıkları çalışmada deniz yosunundan yenilenebilir enerji kaynağı olarak yararlanma olanağını incelemiştir. *Macrocystis pyrifera*, *Durvillea antarctica* ve bunların 1:1 oranında karışımlarının anaerobik fermantasyonu, iki aşamalı anaerobik parçalanma sisteminde değerlendirilmiştir. Sistemde toplam biyogaz üretiminin %70'i yukarı akışlı anaerobik fermantörde üretilmiştir ve her yosun türü %65 dolayında metan konsantrasyonu ile aynı biyogaz üretimine sahiptir. Yosun karışımının anaerobik fermantasyonunda aynı metan içeriği gözlenmesine rağmen düşük biyogaz verimine sahiptir.

Kavacık ve Topaloğlu (2007), çalışmalarında mezofilik koşullarda 26 litrelik bir anaerobik reaktörde 20 litrelik çalışma hacminde peynir altı suyunun fermantasyonu ve biyogaz üretim potansiyeli incelemiştir. Deneylede bakteriyel aşılama yapılmamış, bunun yerine mezofilik sıcaklıklarda anaerobik reaktörde bekletilmiş gübre kullanılmıştır. Deneyle kesikli ve sürekli olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Sürekli sistemde hidrolik alıkonma süresi (HRT) 5, 10 ve 20 gün olarak işletilmiştir. En fazla günlük gaz üretiminin kesikli sistemde 1,39 l/l/gün, sürekli sistemde ise 1,51 l/l/gün ile HRT=5 günde oluştuğunu göstermişlerdir. Buna rağmen en fazla katı madde (KM), uçucu katı madde (UKM) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) arıtım verimi HRT=10 gün de sağlandığını saptamışlardır. Kesikli yapılan deneyde katı madde arıtım verimi %51, uçucu katı madde arıtım verimi %48 ve KOİ arıtım verimi %54 olarak bulmuşlardır. En fazla gaz oluşum miktarı 1,39 l/l/gün iken metan oranı %60 civarında ölçmüşlerdir. Sürekli olarak yapılan deneylerde 3 farklı alıkonma süresinde çalışılmış, alıkonma süresinin arttıkça günlük biyogaz miktarının azaldığı gözlenmiştir. Buna karşılık biyogazdaki metan oranında pek fazla bir farklılık görülmemiştir. Yani metan oranı hidrolik alıkonma süresiyle neredeyse hiç değişmemiş, %60 civarında seyretmiştir. En fazla gaz üretim verimi HRT=5 gün de 1,51 l/l gün iken maksimum KOİ (%54,3), uçucu katı madde (%49,4) ve katı madde arıtım verimi (%49,5) HRT=10 günde gözlenmişlerdir.

Karahasanoğlu (2006), yaptığı araştırmada ülkemizde 65.000 Ton/Gün miktarında çöp çıktığını, çöplerin düzenli depolama ile elektrik eldesinde (deponi gazı üretimi ve yakma ile) değerlendirilmesi de göz ardı edilmemesini, Türkiye biyogaz potansiyeli yaklaşık 25 Milyon kWh olduğunu söylemektedir. Bu potansiyelin değerlendirilmesinin, yeşil elektrik eldesi, organik gübre üretimi, atık kaynaklı çevre kirliliğini azaltma ve AB uyum süreci açılarından ulusal yararlarının olacağını ortaya koymuştur. Ayrıca Dokuzuncu Kalkınma Planı'nda "üretim sistemi içinde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payının azami ölçüde yükseltilmesi hedefi" bulunduğunu dile getirmiştir.

Sözer ve Yıldız (2006), çalışmalarında süt sanayi atığı olan peynir altı suyu ve sığır gübresi çeşitli oranlarda karıştırılarak biyogaz üretimleri saptanmıştır. Denemeler 15 günlük bekleme süresinde, 37°C sıcaklıkta, sürekli akışlı laboratuvar tipi biyogaz üreteçlerinde gerçekleştirilmiştir. Sığır gübresinin organik kuru madde miktarı peynir altı suyununkine eşitleninceye kadar çeşme suyu ile seyreltilmiştir. Denemede saf sığır gübresi, sığır gübresine %5, 10, 20, 40, 50 ve 75 oranlarında peynir suyu katılmış karışımlar kullanılmıştır. Deneme sonuçlarına göre en yüksek biyogaz üretimi %50 peynir suyu, %50 sığır gübresi karışımından 25,47 litre/gün olarak saptanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek biyogaz üretimi %50 peynir altı suyu, %50 sığır gübresi karışımından elde edilmiştir. Fakat %40 ve %50'lik karışımların biyogaz üretimleri arasında %1 önem seviyesinde istatistiksel fark olmadığı saptanmıştır. Peynir altı suyu ilavesi ile biyogaz üretiminde 2,23 katlık artış sağlanmıştır.

Bouallagui vd., (2003), meyve ve sebze atıklarından biyogaz elde etmek için yarı sürekli karıştırıcı bir mezofilik, boru şeklinde bir reaktör denemişlerdir. Denemelerde HRT'nin 12 ve 20 gün arasında değişmesi, fermentasyon stabilitesi üzerinde hiçbir etki etmediğini görmüşler ve pH 6,8 ve 7,6 arasında kalmıştır. Fakat 12 gün altında HRT'de metanojenik bakterilerin bir inhibisyonu gözlenmiştir. Reaktörün genel performansı, besleme konsantrasyonunun %8 ile %10 TS (kuru ağırlık) olarak değiştirilmesiyle Reaktörün genel performansı, besleme konsantrasyonunun %8 ile %10 TS (kuru ağırlık) olarak değiştirilmesiyle bastırılmıştır. . %6 ve HRT'lik bir yem konsantrasyonu uygulayarak boru sistemli reaktör sisteminde 20 gün, %64'lük bir metan içeriğine sahip FVW'nin biyogaz içine %75 dönüşüm etkinliği elde edilmiştir. Boru şeklindeki reaktörün en önemli becerisinin asidogenez ve metanojenizi ayırma faktörüne etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Demirer vd., (2001), yaptıkları çalışmada 1 litre peyniraltı suyundan 23,4 litre metan üretilebileceğini bildirmişlerdir. Çalışma 35°C sıcaklıkta 68 günlük bekleme süresinde, beç sistemde laboratuvar koşullarında cam şişelerde gerçekleştirilmiştir.

Ghaly (1996), yaptığı denemede 2 fazlı üreteç kullanmıştır. Deneme 25 ve 35°C sıcaklık koşullarında ve 10, 15, 20 günlük bekleme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca pH kontrollü ve kontrolsüz olarak peynir altı suyu denemeye alınmıştır. Deneme sonuçlarına göre en fazla biyogaz üretimi pH kontrollü denemelerde elde edilmiştir. 25°C sıcaklık koşullarında en fazla biyogaz üretimi 10 günlük bekleme süresinde gram organik kuru madde başına 83,70 litre biyogaz (%60 CH₄), 35°C sıcaklık koşullarında en fazla biyogaz üretimi yine 10 günlük bekleme süresinde gram organik kuru madde başına 156,55 litre biyogaz (%60 CH₄) olarak tespit edilmiştir. Denemede pH derecesi kontrolünün metan üretimini arttırdığı saptanmıştır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Anaerobik sindirimde kullanılan materyaller

Bu çalışmada biyogaz üretmek amacıyla sığır gübresi, deniz yosunu ve peynir altı suyu kullanılmıştır. Sığır gübresi Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Süt sığırcılığı işletmesinden alınmıştır. Gübrenin içeriğinde hayvanın yemlenmesi sırasında dökülen yemler, hayvanın dışkısı ve idrarı da bulunmaktadır. Denemelerde kullanılan gübreler günlük olarak temin edilmiş ve kullanılmıştır.

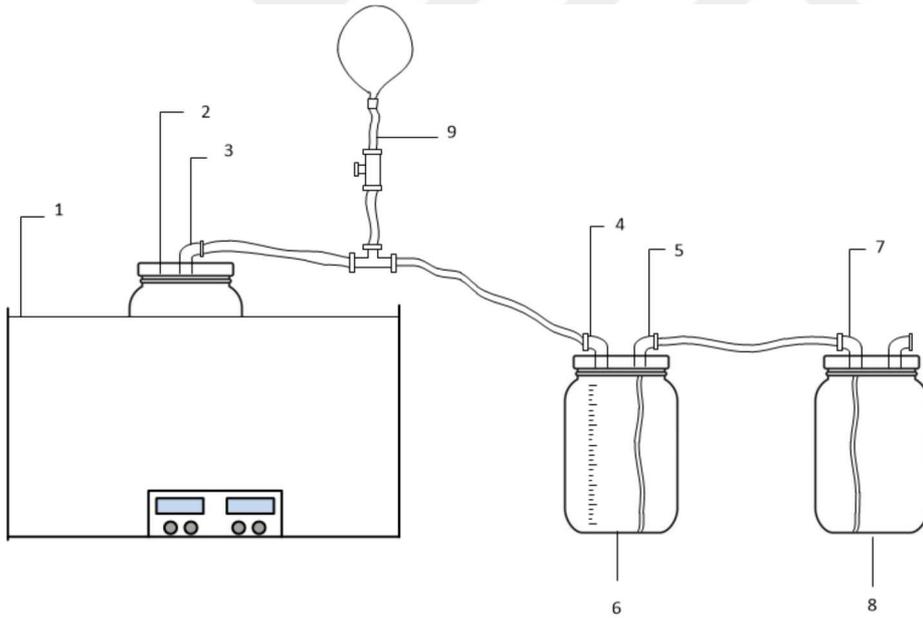
Denemelerde kullanılan deniz yosunu Tekirdağ ili Süleymanpaşa ilçesine bağlı Beyazköy mevki 40°59'18.0"N 27°36'37.9"E sahil şeridinden toplanmıştır. Toplanan yosunlar yıkandıktan sonra parçalanarak macun kıvamına getirilmiştir (Şekil 4.1). Peynir altı suyu ise süt ve süt ürünleri üretimi yapan bir firmadan temin edilmiştir. Peynir altı suyunun kolay bozulabilir yapısı nedeniyle üretim sonrasında alınıp taze bir şekilde kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Sahilden toplanan yosunlar

4.1.2. Deney Düzeneği

Denemelerde reaktör olarak 0,5 litre hacimli cam şişeler kullanılmıştır. Kullanılan bütün şişeler güneş ışığının girişini önlemek amacıyla alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde biyogaz üretimi için gerekli olan ısıyı sağlamak amacıyla su banyosu kullanılmıştır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Reaktörlerde üretilen biyogaz miktarını ölçebilmek amacıyla su yer değiştirme prensibine göre çalışan 2 adet şişe pnömomatik sızdırmazlık elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Reaktöre bağlanan birinci şişe ağızına kadar su ile doldurularak kapatılmış olup şişenin üzerine dereceler eklenmiştir. Böylece reaktörde üretilen gazın meydana getirdiği basınç ile birinci Şişede bulunan su, diğer şişeye geçerek üretilen gaz miktarı hesaplanmıştır. Denemelerde kullanılan bütün şişelerin sızdırmazlıkları el pompası vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Reaktör ile 1 numaralı şişe arasında hapsedilen gazın içeriğini ölçebilmek amacıyla iki şişe arasındaki bağlantı hattına bir adet vana eklenmiştir. Vana vasıtasıyla şişede toplanan gaz örnek torbasına alınabilmektedir.



Şekil 4.2. Deney düzeneği (Çalhan, 2017)

1. Su banyosu, 2. Reaktör, 3. Gaz çıkışı, 4. Gaz girişi, 5. Su çıkışı, 6. Gaz toplama şişesi, 7. Su girişi, 8. Su toplama şişesi, 9. Gaz örnek alma vanası



Şekil 4.3. Deney düzeneği

4.1.3. Su sirkulatör cihazı

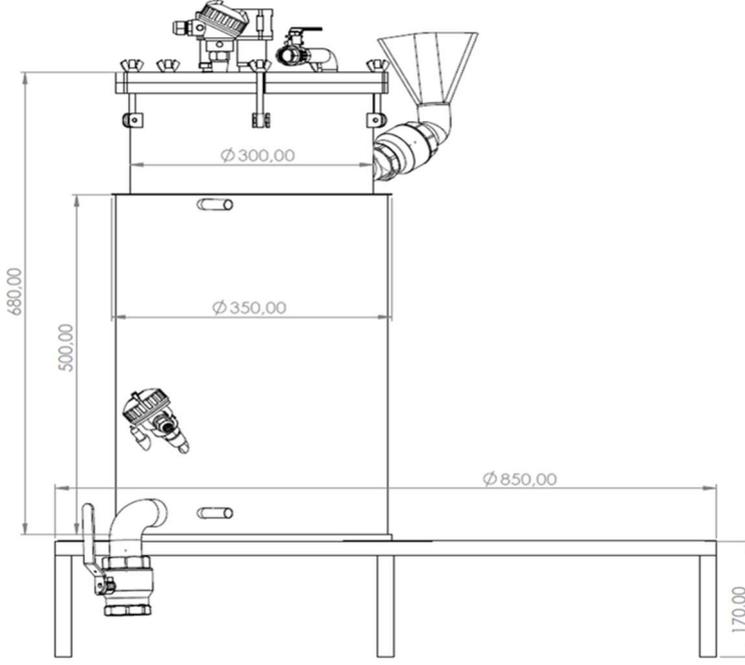
Tasarlanan reaktörün su ceketlerinde uygun sıcaklıktaki suyun dolaştırılması ve sistemin ısısının istenilen değerde tutulması için WiseCircu marka Su sirkulatör cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. WiseCircu marka su sirkulatör cihazı (Kayisoğlu vd., 2014)

4.1.4. Biyogaz Reaktörü

Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen PLC kontrollü biyogaz reaktörü Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu tasarımda reaktör çapı 300 mm ve boyu 650 mm olarak alınmıştır. Reaktörün alt kısmından 500 mm yüksekliği biyogaz karışımı için kullanılmaktadır. Geriye kalan 150 mmlik yükseklik oluşan biyogazın depolanması için kullanılmaktadır. Reaktörün kapağı ile birlikte efektif yüksekliği 680 mm olarak alınmıştır.



Şekil 4.5. Biyogaz reaktörü şematik gösterimi ve ana ölçüler

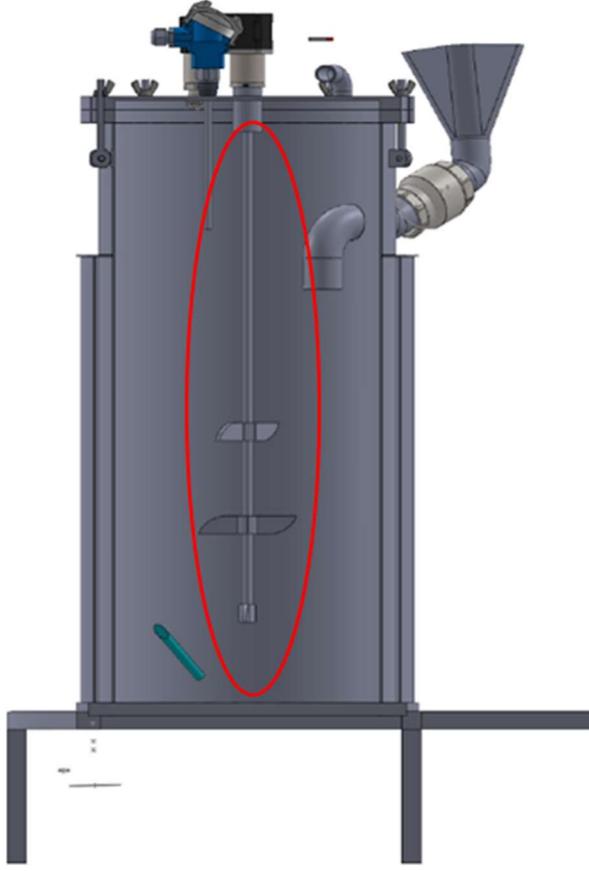
Reaktör silindiri yüksek sıcaklık ve korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten (AISI310S) 5 mm kalınlıkta imal edilmiştir. Diğer üniteler ise imalat çeliğinden (St37) imal edilmiş ve kalınlık olarak 3 mm alınmıştır. İmalatı tamamlanmış biyogaz üretim sistemi Şekil 4.6'da görülmektedir.

Biyogaz reaktörü üzerinde gerekli fermantasyon sıcaklığını sağlamak için sıcak su dolaştırılacak su ceketini yerleştirilmiştir. Reaktörün çapı su ceketini ile birlikte 350 mm olmaktadır. Biyogaz üretimi için takip edilmesi gereken parametreler için reaktör üzerine 2 adet termokupl, 1 adet basınç sensorü, 1 adet pH probu ve 1 adet pH düzenleyici bağlantısı olmak üzere 5 adet bağlantı noktası bulunmaktadır. Yine oluşan gazı sistemden almak için gaz çıkışı bağlantısı eklenmiştir.



Şekil 4.6. İmalatı tamamlanmış biyogaz reaktörü

Reaktör orta kısmında otomatik olarak tahrik edilen bir karıştırıcı ile reaktör içindeki materyallerin homojen olarak karıştırılması gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Reaktör içinde karıştırıcının konumu

4.1.5. Gaz kromatografi cihazı

Üretilen biyogazın gazının bileşimini tespit etmek amacıyla AGILANT 7890B GC (Şekil 4.8) gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır.

GC ölçümleri için taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta Argon, cihaz üzerindeki pnömatik valflerin sağlıklı çalışabilmesi için de kuru hava tüpü kullanılmıştır. Cihazın ölçüm metodu oluşturarak kalibre edilmesi için kullanılan referans gaz tüpü, kuru hava ve argon tüpleri Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.8. Gaz analizlerinde kullanılan gaz kromatografi cihazı



Şekil 4.9. Yüksek saflıkta argon ve kuru hava tüpleri, referans gazı tüpü

4.1.6. Ölçüm ve kontrol donanımı

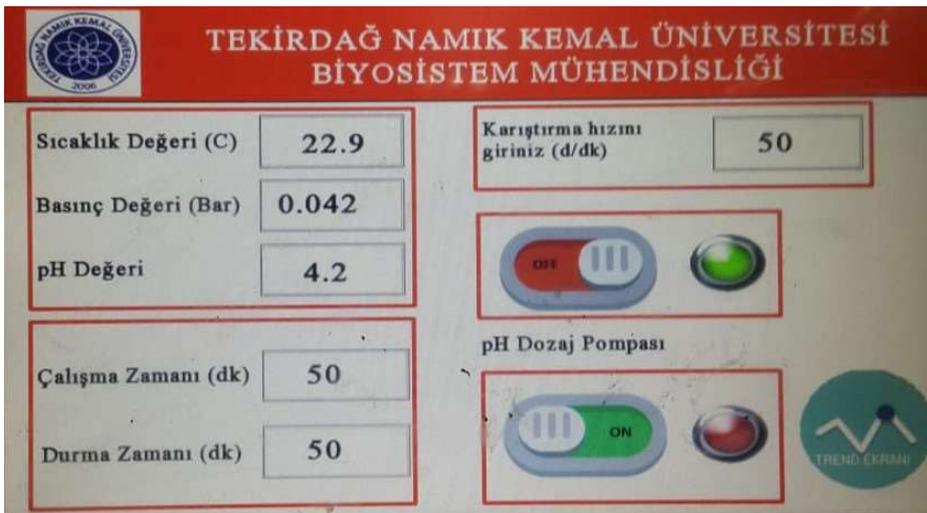
Biyogaz üretim sisteminin proses şartlarını kontrol etmek ve elde edilecek verileri görüntüleyerek kaydetmek üzere geliştirilen PLC kontrollü ölçüm, kontrol ve otomasyon cihaz ve donanımları kullanılmıştır. Sistem yapısal olarak genişletilmeye uygun analog ve dijital

giriş/çıkış kanalları ile donatılmıştır. Geliştirilen sistemin duvar üzerine monte edilmiş hali Şekil 4.10' da verilmiştir.



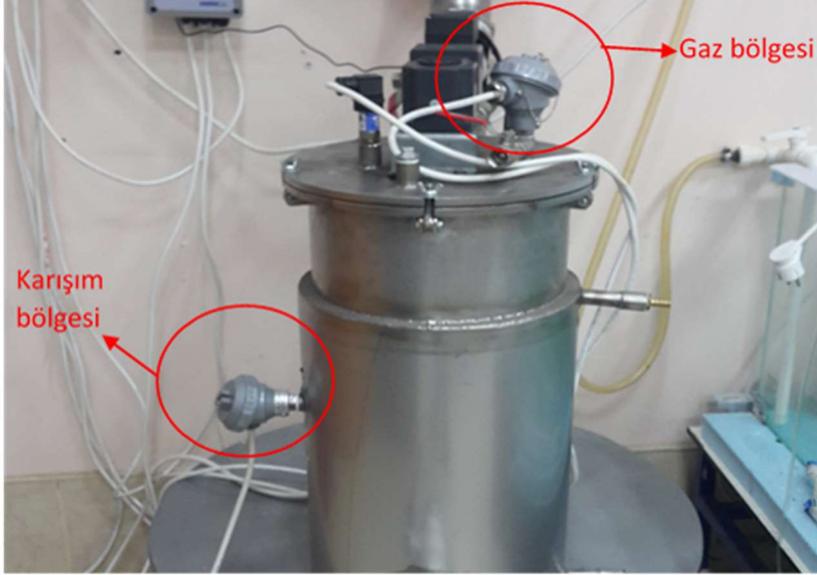
Şekil 4.10. PLC kontrollü ölçüm ve otomasyon sistemi

Geliştirilen bu sistemde 2 ayrı sıcaklık ölçümü, 1 basınç ölçümü, 1 pH ölçümü ve karıştırıcı motor devir kontrol ve zamanlaması yapılmaktadır. Karıştırıcı motorunun devir kontrolü de inverter yardımıyla HMI pano üzerinden kontrol edilebilmektedir. Ölçülen değerler USB bağlantısı ile herhangi bir bilgisayar bağlantısı olmaksızın kaydedilebilmektedir. Değerler sistem üzerinde 7" TFT ekran üzerinden görüntülenmektedir. Şekil 4.11'de kontrol ve görüntüleme ekranı görülmektedir.



Şekil 4.11. Ölçüm ve kontrol donanımı görüntüleme ekranı

Sıcaklık ölçümü için PT100 tipi termokupllar kullanılmıştır. Nikel ve krom alaşımli bu termokupllar -200 - +600 °C'ye kadar kullanılabilir. Termokupllar ile hem karışım hem de gaz sıcaklığı kontrol edilmektedir. Reaktör üzerinde termokuplların yerleşimi Şekil 4.12'de görülmektedir. Reaktör kapağına yerleştirilen basınçölçer, reaktörde oluşan gazın basıncını ölçmektedir.



Şekil 4.12. Reaktör üzerinde termokuplların yerleşimi

4.1.7. PLC Kontakt anahtarı ve güç kaynağı

Biyogaz reaktör otomasyonunun panosu elektrik prizine takıldığı anda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sisteme ilk elektrik verilmesi kontrolü bir anahtar ile düzenlenmiştir. Şekil 4.13'te PLC kontakt anahtarını görülmektedir.



Şekil 4.13. PLC Kontakt anahtarı

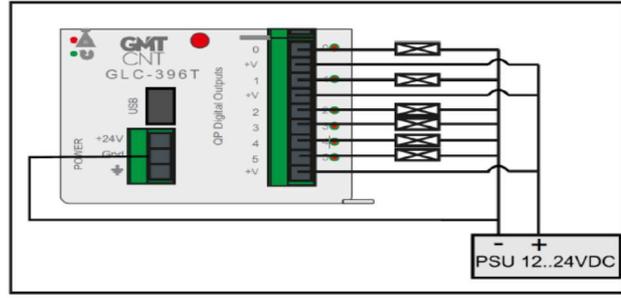
PLC sistemleri doğru akımla çalışabilen sistemlerdir ve aşırı elektrik yüküne karşı çok hassas cihazlardır. Bu nedenle PLC sisteme verilecek elektrik akımının önceden tam olarak kısa devre, aşırı yük ve aşırı voltaja karşı koruma altına alınmış olması gerekmektedir. Biyogaz tesisi otomasyon sisteminde kullanılan güç kaynağı Omron marka S8VK-C06024 model 100-240VAC giriş Voltajını PLC'nin ihtiyaç duyduğu 24VDC, 2,5A doğru akımını sağlamaktadır. Şekil 4.14'te güç kaynağı ve Çizelge 4.1'de güç kaynağı teknik özellikleri görülmektedir.



Şekil 4.14. Güç kaynağı

4.1.8. PLC CPU Modülü

Biyogaz tesisi otomasyonu için kullanılan CPU modülü GMTCNT marka GLC-196T modeldir. Mikroişlemci tabanlı PLC CPU içerisinde program üzerinde kaydedilen adresler ve datalar işlenerek saklanır. GLC-196T modülünün programlama özelliği içerisinde bazı temel komutlar ile uygulama komutları yer almaktadır. Modüle ait temel komutlara müdahale etmek mümkün değildir ama uygulama komutları üzerinde bazı değişiklikler yapılması mümkündür. PLC GMT Soft/GMT Suite ladder editör yazılımı ile programlanabilmektedir. Yazılım yükleme ve testi için GMTSoft/GMT Suite programı PLC arası haberleşmesi CAT5 ethernet kablosu kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 4.15'te GLC-196T modülü verilmektedir.



GLC-X96T Serisi için çıkışlar:

Şekil 4.15. GLC-196T modülü

PLC GLC-196T modül 24VDC besleme, 9 kanal 24VDC PNP/NPN giriş, 6 kanal 24VDC 300mA kısa devre korumalı transistör çıkış ve 3 kanal 20kHz ile 3 eksen servo/step sürme imkanı mevcuttur. Modüler yapı, maksimum 16 genişleme modülü bağlama imkanı ile 271 noktaya kadar destek, 100MB ethernet portu ile ağ üzerinden erişim imkanı, RS232 ve RS485 haberleşme portları, MODBUS RTU protokol desteği, ondalıklı işlem desteği, 12ns komut işleme hızı, DIN RAY montaj ve 3 adet çift fazlı (A,B,Z) encoder veya 3 adet hızlı sayıcı (20kHz) bağlama imkanı, mini USB portu üzerinden programlanabilmektedir.

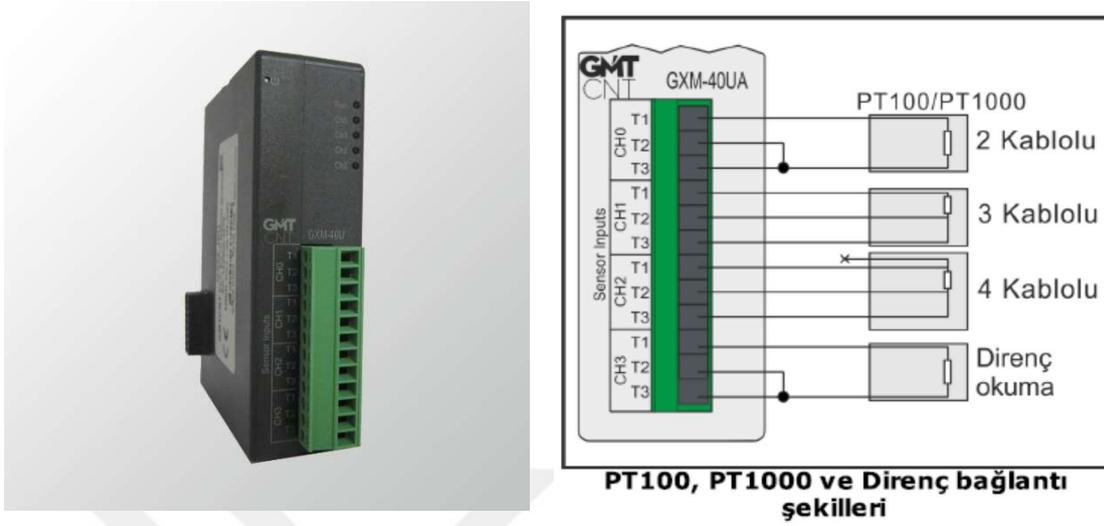
GMT CNT firması tarafından GLC-196T CPU modülü, programlamanın yapıldığı ve sistemin yönetici beyni olarak düşünülebilir bununla birlikte CPU modülüne uyumlu çalışabilen GMT CNT firması tarafından belirlenen/önerilen ilave giriş ve çıkış üniteleri biyogaz sistemi otomasyonunda kullanılmıştır.

4.1.9. PLC Sıcaklık modülü GXM-40U

PLC Genişleme modülüdür. Kullanılan sistemlerde giriş kapasiteleri ve işlevlerini arttırmak için kullanılır. CPU ile beraber çalışır, tek başına çalışmaz. Modül 2/4 kanal sensör girişine sahiptir. Sensörlerin ölçtüğü sıcaklık bilgisini 0,1 °C hassasiyetle okur ve PLC içinde seçilen adrese yazar. Sensör girişleri 15 bit çözünürlük ile okunmaktadır. 0. ve 1. Kanallar 1.grup, 2. ve 3. Kanallar 2. Grup olarak ayrılmıştır. Her bir gruba aynı anda termokupl / mV / NTC yada Pt100 / Pt1000 sensörleri bağlanmalıdır.

Aynı zamanda istenirse her kanal için ayrı ayrı PID fonksiyonu çalıştırılarak hassas sıcaklık kontrolü sağlanabilir. PID fonksiyonu modül içerisinde çalışmaktadır, bu sayede PLC CPU hızında ve kapasitesinde azalma olmaz. Modül sensor kablo kompanzasyonu

yapabilmektedir. Bu sayede kablo boyunun uzunluğu ölçüm doğruluğunu etkilemez. Giriş tipleri Termokupl (B,E,J,K,N,R,S,T), PT-100, PT-1000, NTC (10k@25°C), 0...60mVDC.



Şekil 4.16. PLC Sıcaklık modülü ve bağlantısı

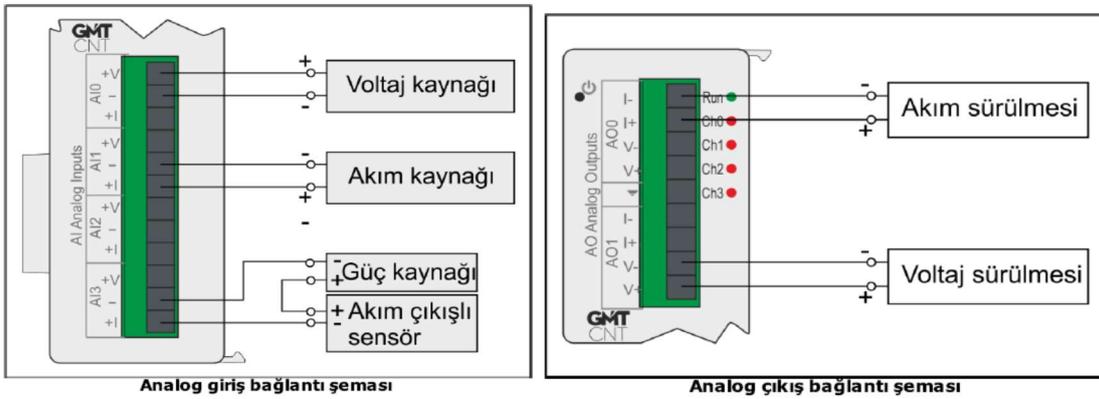
4.1.10. Analog Giriş / Çıkış modülü

Bu modül PLC'ye bağlanan motor, pompa ve sensörler gibi dijital girişi bulunmayan aletleri kontrol etmek amacı ile kullanılır. Analog değerler, direk PLC tarafından okunamaz. PLC cihazı, yalnızca mantık sinyallerini (0, 1 yani, "YOK", "VAR") algılayabilmektedir. Doğrusal sinyallerin PLC tarafından algılanabilmesi için giriş değeriyle orantılı olarak PLC'ye bir sayısal değer atayan analog giriş modülüne ihtiyaç vardır.

PLC genişleme modülüdür. Kullanılan sistemlerde giriş/çıkış kapasiteleri ve işlevlerini arttırmak için kullanılır. CPU ile beraber çalışır, tek başına çalışmaz. Yazılım yapılandırması ve bağlantı şekline göre akım veya voltaj giriş tipleri kullanılabilir. 4 Kanal 0-10VDC, 0-20mA, 4-20mA analog giriş ve 2 kanal 0-10VDC, 0-20mA, 4-20mA Analog çıkışa sahiptir. Kanallar birbirinden bağımsız farklı giriş/çıkış tipi olarak kullanılabilir.



Şekil 4.17. Analog Giriş / Çıkış modülü



Şekil 4.18. Analog Giriş / Çıkış modülü bağlantısı

GXM-42A analog modülü biyogaz reaktörü otomasyonunda kontrol edilen, algılanan ve kumanda elemanlarından gelen elektriksel işaretleri lojik gerilim seviyelerine dönüştüren birimdir. Analog girişlere bağlanan algılayıcılardan gelen doğrusal değerleri olarak analog/sayısal çevirici (ADC) aracılığıyla sayısal bilgiye çevirir.

4.1.11. PT100 sıcaklık algılayıcı

Rezistans termometre olarak da belirtilen PT100 sıcaklık algılayıcı sıcaklık verilerini termistörlere oranla daha hızlı ve hassas ölçüm yapabilme özelliğine sahiptirler. PT100 sıcaklık duyargası -200 °C'den +600 °C'ye kadar, 0,1 °C hassasiyet ile ölçüm yapabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı özellikle endüstriyel alanda ve laboratuvar uygulamalarında tercih edilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan ISISO marka PT100 sıcaklık algılayıcı Şekil 4.19 'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Kafalı tip PT100 sıcaklık sensörü

4.1.12. ENDA - EOP41-070ET Dokunmatik operatör paneli

PLC tabanlı sistemlerde operatörlerin, sistemle haberleşmesini sağlamak için operator panelleri (HMI-Human Machine Interface) kullanılmaktadır. Böylece operatörler bu ekranlar aracılığı ile süreç değişkenlerini gözlemleyebilmekte ve gerektiğinde bunları değiştirerek denetimler yapabilmektedir.

Çalışmada kullanılan dokunmatik operatör paneli PLC otomasyon sisteminde kullanılan Enda marka EOP41-070ET modeldir. EOP4-070 serisi cihazlar fabrika uygulamaları için tasarlanmıştır. Çalışma sıcaklığı -10 ile 50°C arasında değişir. ENDA PLCler de dahil, bilinen birçok PLC ile uyumludur. 65536 renk seçeneğine sahip ve 7 inçlik dokunmatik TFT monitörden oluşmaktadır. 32 bit 520 MHz CPU hızına sahip bu monitör üzerinden otomasyon sisteminin kontrolü gerçekleştirilebilmektedir.

Veri aktarımı ve haberleşme makroları standart seri ASCII haberleşme COM1 giriş/çıkış kapısından RS232 bağlantısı ve COM2 giriş/çıkış kapısından RS485/RS 232 bağlantısı ile sağlanmaktadır. Monitörün bir harici belleğe veri kaydedebilme özelliği bulunmaktadır.

Ekran, otomasyon paneli kapağı üzerine monte edilmiştir, böylelikle hem PLC ile haberleşme mesafesi kısa tutulmuş hem de kapak üzerinden operatörün sistemi kullanımına kolaylık sağlanmıştır. Şekil 4.20’de operatör paneli ekranının ön ve arka kısmı görülmektedir.



Şekil 4.20. Kullanılan dokunmatik operatör paneli (Ön ve Arka görünümü)

4.1.13. Hız kontrol cihazı - AC sürücü –inverter

Sistemde karıştırma motorunun frekans kontrolü GMT CNT inverter (Şekil 4.21) ile yapılmaktadır. Otomasyon panosuna yerleştirilen inverter, operatör paneli (HMI) üzerinden kontrol edilmektedir.



Şekil 4.21. İnverter

İnverter 1 x 220VAC (+/- %15) 50/60Hz besleme gerilimi, V/F ve Açık çevrim vektör kontrol, Yüksek başlangıç torku (0,5Hz' de %150), 6 Adet PNP/NPN dijital giriş, 1 Adet röle çıkışı, 1 Adet 0-10VDC / 4-20mA analog giriş, 1 Adet 0-10VDC / 4-20mA analog çıkış, PID kontrol, Yerleşik Modbus RTU' yu destekleyen RS-485 haberleşme portu, 3000Hz'e kadar ayarlanabilen çıkış frekansı özelliklerine sahiptir.

4.1.14. Trifaze güç kontaktörü

Karıştırıcı motoruna elektrik verilmesi için Schneider 18A (7,5 KW) 24VDC bobin beslemeli 1NO+1NC yardımcı kontaklı trifaze güç kontaktörü kullanılmıştır (Şekil 4.22).



Şekil 4.22. Trifaze güç kontaktörü

4.1.15. Karıştırıcı motoru

Karıştırıcı motoru olarak FINEX marka E1610-40-17B-C redüktörlü alternatif akım 3 fazlı minyatür motor kullanılmıştır. Motor 40 W güç, 0,358 A ve 50 Hz frekansa sahiptir. Maksimum 1350 d/d devir sayısına ulaşmaktadır.

Karıştırma motorunun çalışma süresi, bekleme süresi dakika olarak girilmektedir. Dokunmatik panel üzerinden girmek istenilen değer girildiğinde Şekil 4.23'deki pencere açılmaktadır. Enter tuşuna basıldığında sistem devreye girmektedir. Açma-Kapama düğmesini ON konumunda iken girilen değer aralığında karıştırma motoru gün içerisinde otomatik olarak çalıştırmaktadır.



Şekil 4.23. Karıştırma motoru değer girme penceresi

4.1.16. Basınç sensörü

Çalışmada BCT-22-10b-v-g1, basınç sensörü (Şekil 4.24) kullanılmıştır. Sensörün giriş aralığı 0...10 bar, çıkış aralığı ise 4...20 mA'dir. Besleme gerilimi 12...30 VDC aralığındadır. Mekanik basınç bağlantısı G ¼" erkek dişlidir.



Şekil 4.24. Basınç sensörü

4.1.17. Sistem Yazılımları

Sistemde PLC programlamak için Endasoft editör programı ve Enda operatör panelleri (HMI) için geliştirilen editör programlama yazılımları kullanılmıştır.

4.1.18. PLC Programlayıcı

PLC programlayıcısı olarak EndaSoft PLC editör programı kullanılmıştır. Bu editör programı endüstride yaygın olarak tercih edilen Ladder (Merdiven) metodunu desteklemektedir. ENDA Soft programı, üzerine kurulan simülasyon eklentisi ile PLC olmadan da yazılan PLC programını offline olarak simule edebilme ve gerekli kontrolleri gerçekleştirilebilme özelliğine sahiptir. Editör programına, gerçek sistemde kullanılan PLC CPU tipini ve genişleme modüllerini tanıtmak gerekmektedir. Bunların yanında hangi modüllerin giriş/çıkış noktalarının hangi adreslere yerleşeceği de tanımlanmalıdır. Bunun için donanım konfigürasyonu kullanılır.

4.1.19. HMI Programlayıcı

HMI (Human Machine Interface- operatör paneli) programlayıcısı olarak ENDA_V2.0 HMI editör programı kullanılmıştır. Bu programlayıcı üzerinde operatör panelinin görsel ve fonksiyonel tasarımı gerçekleştirilmektedir.

4.1.20. pH Probu

0 - 80 °C sıcaklık aralığında, 5 mikrosiemens iletkenliğe sahip ortamlarda pH ölçüm yapabilme özelliği sayesinde galvanik proses, atıksu arıtma, soğutma kulesi suyu pH ölçümü uygulamaları için kullanılan Seko SPH-3-WW pH probu kullanılmıştır (Şekil 4.25). pH probuna ait teknik özellikler Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 4.25. pH probu

4.1.21. pH kontrol paneli

pH probunun kalibrasyonunun yapılması ve reaktörden okunan pH değerinin PLC mikro işlemcisine aktarılması için Şekil 4.26’da gösterilen Seko marka Kontrol 40 Tek Parametrelili pH kontrol cihazı kullanılmıştır. Cihaz duvara montaj yapılmaktadır. Kontrol cihazının üzerinde 2 adet röle çıkışı mevcuttur. PLC ile bağlantı için 4-20 mA akım çıkışı vermektedir. Prob bağlantısı BNC bağlantı tipidir.



Şekil 4.26. pH kontrol cihazı

4.2. Yöntem

Laboratuvar ölçekli anaerobik sindirim denemeleri mezofilik sıcaklık şartları altında, 3 tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir. Denemede kesikli anaerobik sindirim yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada karışım oranı, katı madde miktarı ve sıcaklık olmak üzere 3 faktör dikkate alınmıştır. Hazırlanan deneme deseni Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Gübre, yosun ve peynir altı suyu materyallerinin karışım oranları yüzde olarak sırasıyla 50:30:20, 30:20:50 ve 20:50:30’dur. Bu karışım oranları ayrı ayrı, karışımın kuru madde içeriğine göre su ile seyreltilerek kuru madde oranı %10, %12 olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar 4 farklı sıcaklık koşulunda (30 °C, 35 °C, 40 °C ve 45 °C) anaerobik sindirime tabi tutulmuştur. Bu katı içerik oranları, ıslak anaerobik sindirim olarak adlandırılmaktadır (Ayhan, 2013).

Deneme başlangıcında, karışımların pH’sı NaOH katılarak 6,8-7,0 değerleri arasında ayarlanmıştır. Sindirici tabanına çökmeyi önleyerek karışımın homojenliğini sağlamak ve

karışımın üst seviyesinde kabuk oluşumunu engellemek için sindirici günde 3 kez, 1-2 dakika karıştırılmıştır. Denemelerde kullanılan gübre, yosun ve peynir altı suyu hiçbir ön işleme tabi tutulmadan, temin edildiği gibi bekletilmeden kullanılmıştır. Denemelerde kullanılan materyallerin özelliklerini belirlemek amacıyla anaerobik sindirimden önce tüm analizler standart metotlar kullanılarak yapılmıştır. Kuru madde tayininde ham materyal kullanılmıştır. Denemelerde istenilen kuru madde oranının sağlanması için, her bir materyalin kuru maddesi (KM) etüvde 105 °C’de sabit tartıma gelene kadar bekletilmesi ile belirlenmiştir. Kül (XA) ve uçucu katı (UK) tayini materyallerin 550 °C’de kül fırınında yakılması ile yapılmıştır (Karabulut ve Canbolat, 2005).

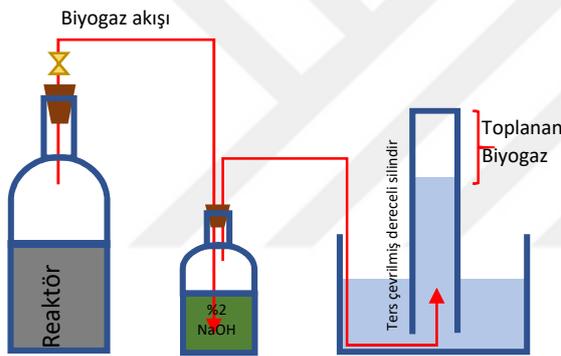
Çizelge 4.1. Laboratuvar ölçekli anaerobik sindirim deneme deseni

Deney No	Sıcaklık °C	Karışım Oranı %	Toplam Katı Madde %	Deney No	Sıcaklık °C	Karışım Oranı %	Toplam Katı Madde %
1	30	50:30:20	10	13	30	50:30:20	12
2	30	30:20:50	10	14	30	30:20:50	12
3	30	20:50:30	10	15	30	20:50:30	12
4	35	50:30:20	10	16	35	50:30:20	12
5	35	30:20:50	10	17	35	30:20:50	12
6	35	20:50:30	10	18	35	20:50:30	12
7	40	50:30:20	10	19	40	50:30:20	12
8	40	30:20:50	10	20	40	30:20:50	12
9	40	20:50:30	10	21	40	20:50:30	12
10	45	50:30:20	10	22	45	50:30:20	12
11	45	30:20:50	10	23	45	30:20:50	12
12	45	20:50:30	10	24	45	20:50:30	12

Çizelge 4.1’de verilen deneme desenine göre yapılan denemeler sonucunda her bir deney için günlük ve toplam biyogaz verimleri tespit edilmiştir. Yine her bir deney için elde edilen gaz örneğinin içeriğindeki metan miktarı saptanmıştır.

4.2.1. Biyogaz veriminin saptanması

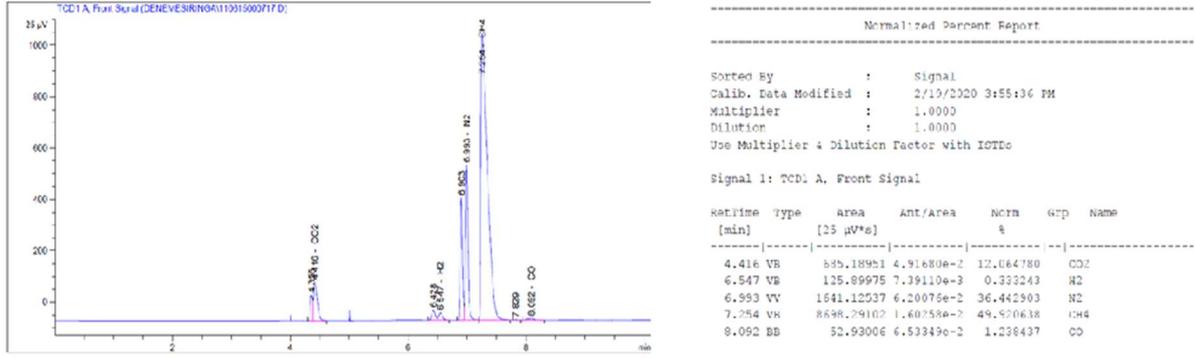
Biyogaz verimini belirlemek amacıyla, reaktörden üretilen biyogaz, su yer değiştirme yöntemiyle günlük olarak izlenmiş ve gaz bileşimi (CH_4/CO_2) düzenli olarak bir gaz kromatografisi ile analiz edilmiştir. Başlangıçta her bir örnek kabına (reaktöre) 100 ml hammadde karışımı konulmuştur. Su yer değiştirme yönteminin kullanımı için bir şematik diyagram Şekil 4.27’de verilmiştir (Esposito vd., 2012; Budiyono vd., 2010). Sudaki karbondioksitin çözünmesini en aza indirmek için asitlendirilmiş su ($\text{pH}<2$) kullanılmıştır (Monlau vd., 2011).



Şekil 4.27. Ters kademeli silindir kullanımının şematik diyagramı

4.2.2. Biyogazın bileşiminin saptanması

Reaktörde oluşan gaz içeriği (karbondioksit ve metan) AGILANT 7890B GC gaz kromatografisi cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucu reaktörde oluşan gaz içerisindeki metan ve karbondioksit gazları tespit etmek için alınan örnek gaz kromatografisi cihazına enjektör ile enjekte edilmiştir. Elde edilen gazın biyometan (CH_4), ve CO_2 , oranları GC cihazına ait yazılım kullanılarak kaydedilmiştir. Şekil 4.28 yapılan bir gaz analizi raporu örneğini göstermektedir.



Şekil 4.28. Agilent 7890B GC gaz kromatografi cihazı ile yapılan bir biyogaz analizi raporu örneği

4.2.3. Biyogaz reaktörünün kullanılması

Çalışma kapsamında geliştirilen ve sindirim hacmi 30 litre olan biyogaz reaktöründe en yüksek biyometan potansiyeline sahip olan koşullarda sindirim işlemi yapılmıştır. Bu denemede hidrolik bekleme zamanı (HRT) 12 gün olarak ayarlanmıştır. Otomasyon sistemine kaydedilen pH, basınç ve sıcaklık değişimleri değerlendirilmiştir.

4.2.4. İstatistiksel analizler

Araştırma sonucu elde edilen veriler SPSS Ver18 istatistik paket programında iki yönlü varyans analizi (TWO WAY ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Analiz öncesinde verilerin normal dağılım gösterip göstermediği Kolmogorof Simirnow ve Shapiro-Wilk testleri ile varyansların homojenliği varsayımı Levene testi ile test edilmiştir. Ortalamalar arasındaki farklılığı gösteren gruplandırmalar Duncan testine göre yapılmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Hammadde analiz sonuçları

Anaerobik sindirim denemelerinde kullanılan süt sığırı gübresi, deniz yosunu ve peynir altı suyunun katı madde, uçucu katı madde ve kül tayinlerini belirlemek için yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Sığırı Gübresi %KM değeri ile ilgili literatürde benzer sonuçları Budiyono vd., (2014), %22,75; Olojede vd., (2018) %21,78 ve Abdallah vd., (2018) %22,6 – 25,3 olarak bulmuştur. Deniz yosunu ile ilgili benzer sonuçları Tatarchenko (2011) %KM değeri %17 ve Marquez vd., (2015) KM %17,30 olarak bulmuştur. Peyniraltı suyu KM değerleri ile ilgili benzer sonuçları Carlini vd., (2015) KM: %5,88 ve Antonelli vd., (2016) KM %5 - 6 olarak bulmuştur.

Çizelge 5.1. Anaerobik sindirimde kullanılan hammaddelerin özellikleri

Hammadde	Katı madde (KM) (%)	Uçucu katı (UKM) (% KM)	Kül (%KM)
Sığır Gübresi	23,47	80,51	19,49
Deniz yosunu	17,20	63,89	36,11
Peynir altı suyu	5,43	79,26	20,74

5.2. Anaerobik sindirim deney sonuçları

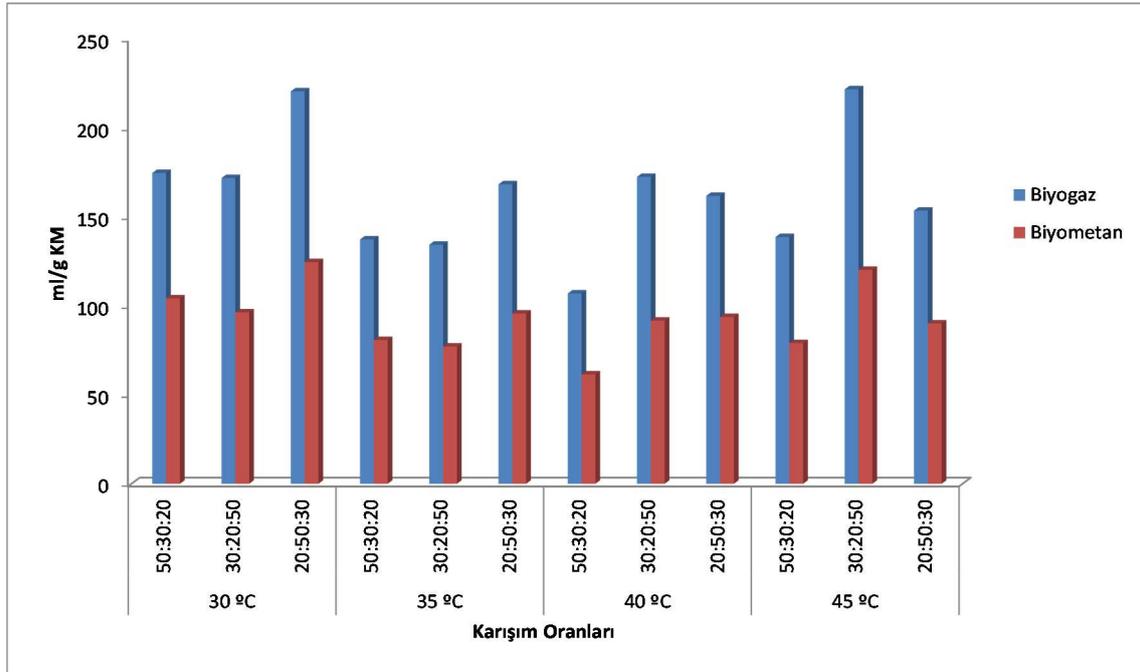
Laboratuvar ölçekli anaerobik sindirim denemelerinde biyogaz üretimi 12 gün devam etmiştir. Denemelere ait sonuçlar Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Shin vd., (2019) biyogaz üretimi üzerine etkisini araştırmak için yosun ilavesi kullandıkları çalışmada biyogaz üretiminin 8-14 günde tamamlandığını bildirmişlerdir. Hublin vd., (2012) yaptıkları çalışmada ise peynir altı suyu ve inek gübresinin kofermantasyonu sonucunda biyogaz üretmek için seri halinde kesikli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Karışım içerisindeki peynir altı suyunun miktarının biyogaz üretimine etkisi 35 ve 55 °C sıcaklıkta değerlendirilmiştir.

Deneme başlangıcında karışımların pH'sı 6,9-7,4 değerleri arasında değişim göstermiştir. Denemeler başladıktan sonraki ilk 48 saat içinde deney numunelerinin pH'sı 4,6-5,5 değerleri arasına düşmüştür. Düşen pH değerleri NaOH kullanılarak tekrar ayarlanmıştır. pH değerleri sabit olana kadar bu işlem tekrarlanmıştır.

Kavacık ve Topaloğlu (2007), yaptıkları deneyde peynir altı suyu ilave edildikten sonra ilk günlerde pH'da düşme gözlemlenmiş olup pH oranını yaklaşık 7 civarında tutmak amacıyla 3-4 gün boyunca günde 3 defa sodyum bikarbonat ilavesiyle pH ayarlaması yapmışlardır. 4 günden sonra sistem dengeye ulaştığından pH da düşüş gözlenmemiş ve pH ayarlamasına gerek duyulmamıştır.

Katı madde oranının %10 olduğu denemelerde en yüksek biyogaz verimi 30:20:50 oranlarındaki karışımda 221,74 ml/g KM değeriyle 45 °C sıcaklıkta elde edilmiştir, ancak en yüksek biyometan verimi 20:50:30 karışım oranında 124,61 ml CH₄/g KM değeriyle 30 °C sıcaklıkta olmuştur. En düşük biyogaz verimi ise 50:30:20 karışım oranında 106,98 ml/g KM olarak 40 °C'de bulunmuştur. Bu karışım oranında ve sıcaklıkta metan veriminin de 61,47 ml CH₄/g KM değeriyle en düşük olduğu görülmüştür (Çizelge 5.2). Şekil 5.1'de %10 katı madde içeriğinde sıcaklık ve karışım oranlarına bağlı olarak biyogaz ve biyometan üretim değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. %10 katı madde içeriğinde sıcaklık ve karışım oranlarına göre biyogaz ve biyometan üretim değerleri

Çizelge 5.2. %10 katı madde oranında biyogaz ve biyometan verimleri

Deney no	Sıcaklık (°C)	Karışım oranları (%)	pH		Biyogaz verimi (ml/g KM)	Biyometan oranı (%)	Biyometan verimi (ml CH ₄ /g KM)
			ilk	son			
1	30	50:30:20	7,2	6,9	174,71	59,66	104,23
2		30:20:50	7,1	6,8	171,86	56,06	96,34
3		20:50:30	7,1	7,0	220,59	56,49	124,61
4	35	50:30:20	7,4	7,1	137,34	58,85	80,82
5		30:20:50	7,0	6,9	134,39	57,40	77,14
6		20:50:30	7,0	6,5	168,34	56,84	95,68
7	40	50:30:20	7,1	6,7	106,98	57,46	61,47
8		30:20:50	7,1	6,8	172,50	53,16	91,70
9		20:50:30	6,9	6,9	161,84	57,92	93,74
10	45	50:30:20	7,1	6,7	138,70	57,01	79,07
11		30:20:50	7	6,6	221,74	54,23	120,25
12		20:50:30	7,1	6,8	153,53	58,70	90,12

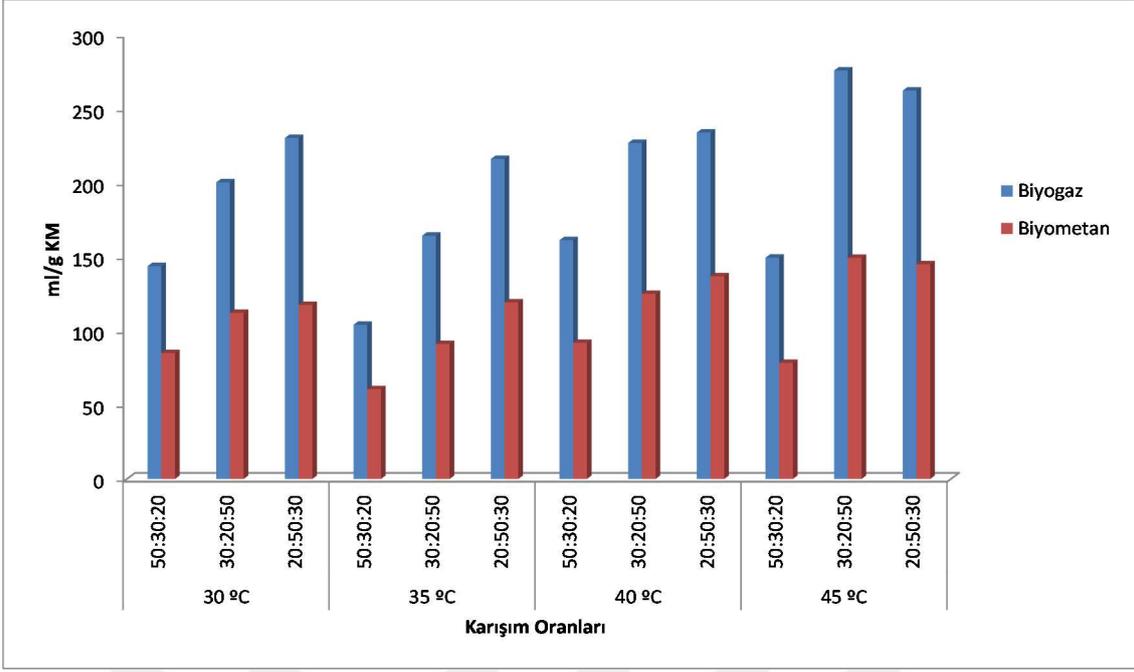
%12 katı madde oranıyla yapılan denemelerde 30:20:50 karışım oranında ve 45 °C sıcaklıkta 276,04 ml/g KM değeriyle en yüksek biyogaz verimi elde edilmiştir. En yüksek biyometan verimi ise yine bu karışım oranı ve sıcaklıkta 149,42 ml CH₄/g KM değeri ile elde edilmiştir. En düşük biyogaz ve biyometan üretimi 104,23 ml/g KM ve 60,65 ml CH₄/g KM değerleriyle 35 °C sıcaklıkta 50:30:20 karışım oranında bulunmuştur (Çizelge 5.3). Sıcaklık ve karışım oranlarına bağlı olarak biyogaz ve biyometan verimlerinin değişim grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. %12 katı madde oranında biyogaz ve biyometan verimleri

Deney no	Sıcaklık (°C)	Karışım oranları (%)	pH		Biyogaz verimi (ml/g KM)	Biyometan oranı (%)	Biyometan verimi (ml CH ₄ /g KM)
			ilk	son			
13	30	50:30:20	7,3	6,9	143,86	59,12	85,05
14		30:20:50	7,2	6,8	200,46	55,99	112,24
15		20:50:30	7,0	6,8	230,46	51,02	117,58
16	35	50:30:20	7,2	6,9	104,23	58,19	60,65
17		30:20:50	7,1	6,5	164,44	55,45	91,18
18		20:50:30	7,2	6,7	216,26	55,16	119,29
19	40	50:30:20	7,2	7,0	161,41	56,99	91,99
20		30:20:50	7,1	6,9	227,08	55,08	125,08
21		20:50:30	6,9	6,7	234,12	58,50	136,96
22	45	50:30:20	7,1	6,9	149,57	52,45	78,45
23		30:20:50	7,0	6,7	276,04	54,13	149,42
24		20:50:30	7,1	6,8	262,49	55,27	145,08

Hublin vd., (2012), peynir altı suyunun inek gübresi ile birlikte sindirildiğinde tek aşamalı bir toplu işlemde verimli bir şekilde biyogaza indirgenebileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada maksimum biyogaz üretimi ve metan içeriği için en uygun koşulların, alkalinite kontrolü için 5 g/dm³ NaHCO₃ ilavesiyle, başlangıç substrat karışımında %10 peynir altı suyu, 55°C sindirici sıcaklığı olduğunu bildirmişlerdir.

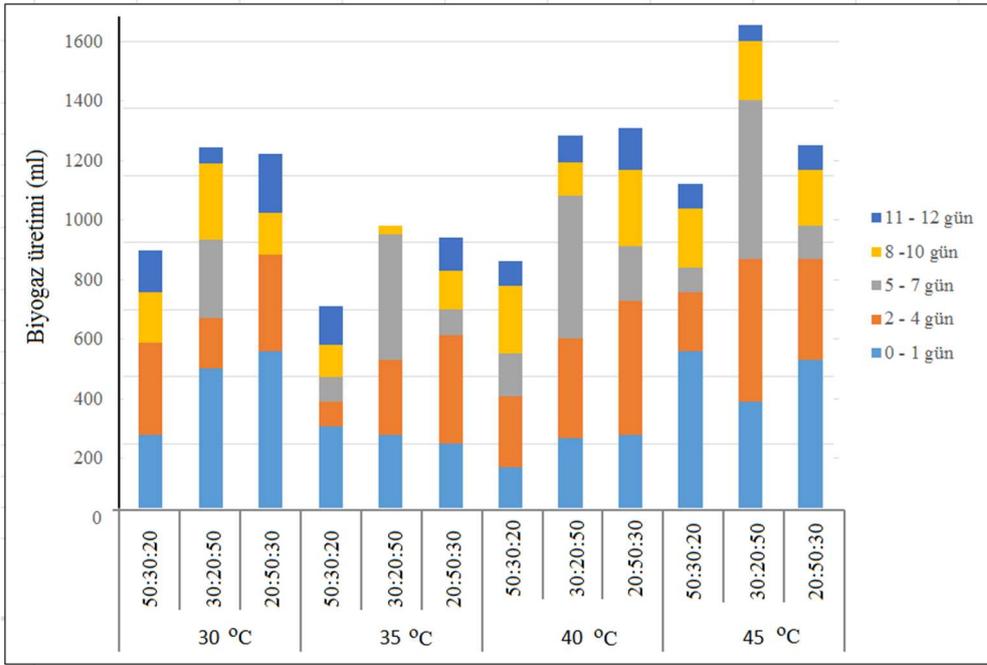
Koçer ve Özçimen (2018), yaptıkları çalışmada, alg biyogaz veriminin sıcaklıkla doğru orantılı ve parçacık boyutu ile ters orantılı olduğunu bulmuşlardır. Alg atıklarından biyogaz üretimi için en uygun koşullar 55 °C sıcaklık olarak belirlemişlerdir.



Şekil 5.2. %12 katı madde içeriğinde sıcaklık ve karışım oranlarına göre biyogaz ve biyometan üretim değerleri

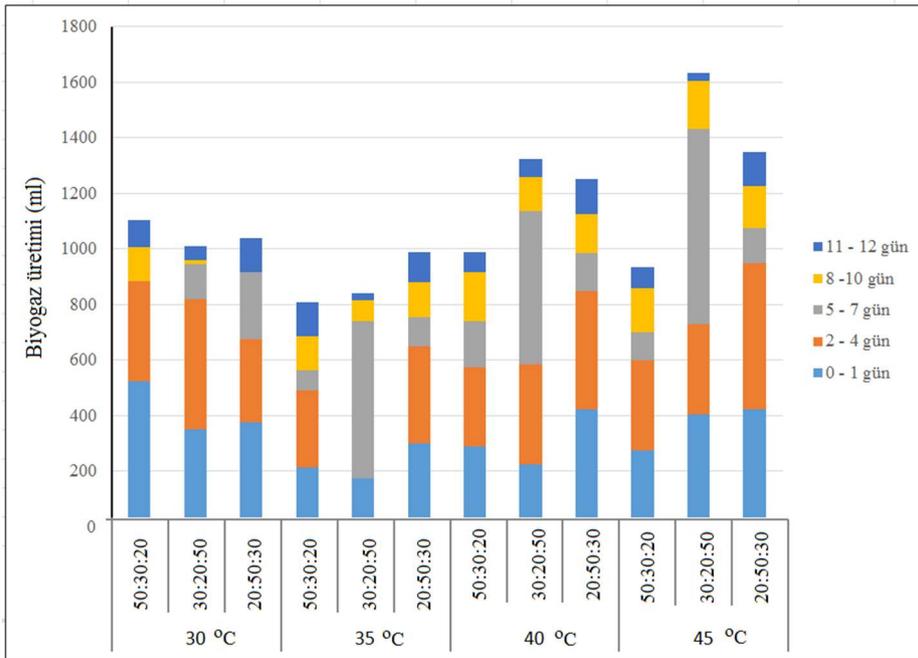
5.3. Günlük biyogaz üretim miktarlarının değerlendirilmesi

12 günlük hidrolik bekleme süreleri (HRT) sonucunda %10 katı madde içeriğine sahip karışım örneklerinin farklı sıcaklıklardaki biyogaz üretim miktarlarının günlük değişimlerinin grafiği Şekil 5.3'te verilmiştir. Başlangıçta biyogaz üretimi düşük olmasına rağmen 45 °C sıcaklıkta 30:20:50 karışım oranında en fazla biyogaz üretimi olduğu görülmüştür. Genel olarak sıcaklık arttıkça biyogaz üretiminin bütün karışımlarda fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3. %10 katı madde içeriğinde biyogaz üretim miktarları

Katı madde içeriğinin %12 olduğu denemelerde biyogaz üretim miktarları Şekil 5.4'te verilmiştir. %10 katı madde içeriğinde olduğu gibi 12 günlük bekleme süresinde 45 °C sıcaklıkta 30:20:50 karışım oranında en fazla biyogaz üretimi olmuştur. Bütün karışım oranlarında 2-4 gün arasında hemen hemen aynı miktarlarda biyogaz üretimi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. %12 katı madde içeriğinde biyogaz üretim miktarları

5.4. İstatistiki değerlendirmeler

Biyometan üretim miktarının katı madde, sıcaklık ve karışım oranlarından ne ölçüde etkilendiğini anlamak için katı madde ile sıcaklık, katı madde ile karışım oranları ve sıcaklık ile karışım oranları ayrı ayrı iki yönlü varyans analizine tabi tutulmuşlardır. Analizlere başlamadan önce yapılan Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk normallik testlerinin sonuçları Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6’da verilmiştir. Test sonuçlarında her iki test yönteminde de verilerin normal ve homojen bir dağılım gösterdiği görülmüştür ($p>0.05$). Bu sonuçlara göre gruplar arasında iki yönlü varyans analizlerinin yapılmasında bir sakınca bulunmadığı anlaşılmıştır.

Çizelge 5.4. Katı madde biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi

	KM	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		İstatistik	SD	p	İstatistik	SD	p
BMP	%10	,174	12	,200	,960	12	,786
	%20	,150	12	,200	,961	12	,801

Çizelge 5.5. Sıcaklık biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi

	Sıcaklık	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		İstatistik	SD	p	İstatistik	SD	p
BMP	30 °C	,149	6	,200	,980	6	,951
	35 °C	,172	6	,200	,978	6	,940
	40 °C	,261	6	,200	,923	6	,529
	45 °C	,235	6	,200	,853	6	,166

Çizelge 5.6. Karışım oranları biyolojik metan potansiyeli homojenlik testi

	Karışım oranları	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
		İstatistik	SD	p	İstatistik	SD	p
BMP	20:50:30	,207	8	,200	,920	8	,434
	30:20:50	,190	8	,200	,956	8	,766
	50:30:20	,202	8	,200	,940	8	,614

Katı madde ile karışım oranlarının biyometan üretim potansiyeli üzerindeki ortak etkilerini saptamak amacıyla yapılan iki yönlü varyans analiz testinin sonuç tablosu Çizelge 5.7’de verilmiştir. Katı madde ve karışım oranlarının biyometan üretim miktarı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip oldukları görülmüştür ($p<0.05$). Ancak, bu iki parametrenin ortak etkileri (interaksiyon) dikkate alındığında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır ($p>0.05$).

Çizelge 5.7. Katı madde ile karışım oranlarının varyans analiz tablosu

Kaynak	GKT	SD	KO	F	p
Intercept	245 660,994	1	245 660,994	802,407	,000
KM	1 630,202	1	1 630,202	5,325	,033**
KARIŞIM	5 492,803	2	2 746,402	8,971	,002*
KM * KARIŞIM	1 096,493	2	548,247	1,791	,195
Hata	5 510,792	18	306,155		
Toplam	259 391,284	24			

* $p<0,01$ seviyesinde önemli, ** $p<0,05$ seviyesinde önemli

Biyometan üretiminde anlamlı bir etkiye sahip olan karışım oranlarının çoklu karşılaştırma (Duncan) analiz sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Analiz sonucunda 50:30:20 karışım oranında biyometan üretiminin en düşük düzeyde olduğu ve diğer iki karışım oranından farklı bir grup oluşturduğu görülmüştür. 30:20:50 ve 20:50:30 karışım oranları arasında istatistiki olarak anlamlı bir fark bulunmamış ve ikisi de aynı grupta yer almıştır.

Çizelge 5.8. Karışım oranlarının çoklu karşılaştırma (Duncan) analizi

Karışım oranları	n	Gruplar	
		a	b
50:30:20	8	80,22	
30:20:50	8		107,92
20:50:30	8		115,38
p		1,000	,470

Katı madde ile sıcaklık parametrelerinin birlikte değerlendirildiği iki yönlü varyans analizinin sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir. Sıcaklık ortalamaları dikkate alındığında katı madde miktarları arasında anlamlı bir fark olmamıştır ($p>0,05$). Sıcaklığın da tek başına biyometan verimi üzerinde anlamlı bir etkisi olmamıştır ($p>0,05$). Anaerobik sindirim sırasında özellikle termofilik sıcaklıklarda ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$) biyometan veriminin arttığı belirtmektedir (Ge ve ark. 2016). Ancak, bu çalışmada anaerobik sindirim mezofilik sıcaklık aralıklarında ($30\text{-}45\text{ }^{\circ}\text{C}$) kullanıldığından sıcaklığın tek başına biyometan verimi üzerinde etkisi olmamıştır. Katı madde ve sıcaklığın ortak etkileri de (interaksiyon) biyometan verimi üzerinde istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$).

Çizelge 5.9. Katı madde ile sıcaklıkların varyans analiz tablosu

Kaynak	GKT	SD	KO	F	p
Intercept	245 660,994	1	245 660,994	448,689	,000
KM	1 630,202	1	1 630,202	2,977	,104
SICAKLIK	1 826,748	3	608,916	1,112	,373
KM * SICAKLIK	1 513,208	3	504,403	,921	,453
Hata	8 760,131	16	547,508		
Toplam	259 391,284	24			

Sıcaklık ve karışım oranlarının biyometan verimine etkilerini belirlemek için yapılan iki yönlü varyans analizinin sonuçları Çizelge 5.10’da verilmiştir. Karışım oranlarının ortalamaları

dikkate alındığında sıcaklıklar biyometan üretim miktarları üzerinde anlamlı bir etki göstermemişlerdir ($p>0,05$). Daha önceki analizde olduğu gibi karışım miktarları biyometan üretimini istatistiki olarak anlamlı ölçüde etkilemiştir. Bu etkinin çoklu karşılaştırma (Duncan) testi Çizelge 5.8’de verildiğinden tekrar test yapılmasına gerek duyulmamıştır. Sıcaklık ve karışım oranlarının ortak etkileri de anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$).

Çizelge 5.10. Sıcaklık ve karışım oranlarının varyans analiz tablosu

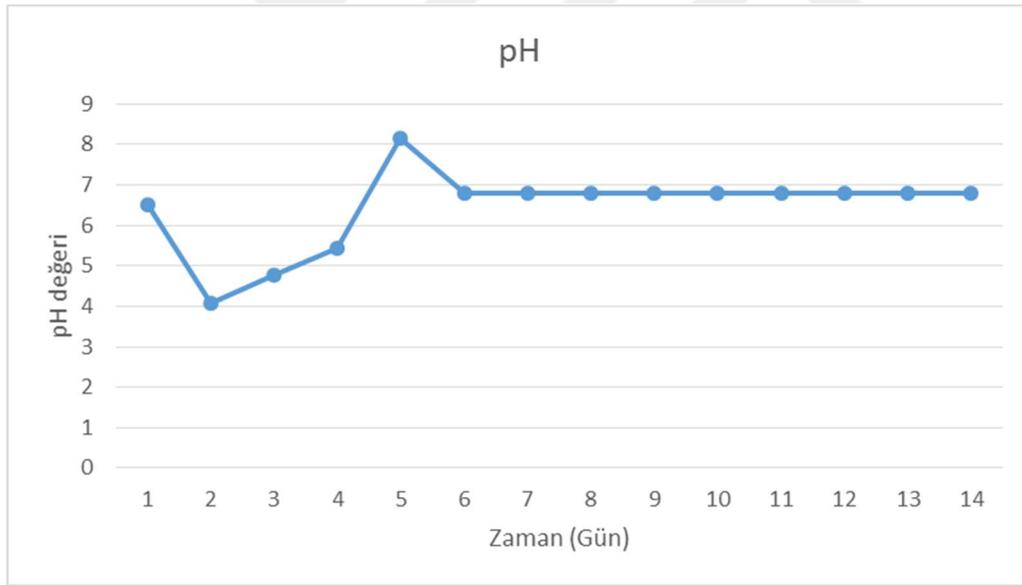
Kaynak	GKT	SD	KO	F	p
Intercept	245 660,994	1	245 660,994	613,065	,000
SICAKLIK	1 826,748	3	608,916	1,520	,260
KARIŞIM	5 492,803	2	2 746,402	6,854	,010**
SICAKLIK*KARIŞIM	1 602,226	6	267,038	,666	,679
Hata	4 808,512	12	400,709		
Toplam	259 391,284	24			

Yapılan varyans analizlerinin sonuçlarına göre biyometan üretim potansiyeli üzerinde katı madde miktarının, karışım oranları dikkate alındığında, anlamlı bir etkiye sahip olduğu, sıcaklığın anlamlı bir etkide bulunmadığı, ancak karışım oranlarının anlamlı bir şekilde etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Sığır gübresi oranının yüksek olduğu 50:30:20 karışım oranında biyometan üretimi diğer karışım oranlarına göre oldukça düşük bulunmuştur. Karışımların içinde sığır gübresi oranı azaldıkça biyometan üretim potansiyelinin arttığı görülmektedir (Çizelge 5.8). Bu durum karışımı oluşturan hammaddelerin metan üretim potansiyelinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Sığır gübresinin teorik biyometan verimi ortalama 210 ml/g UKM, peynir altı suyunun 420 ml/g UKM dolaylarındadır (Sawyer vd., 2019; Deublein ve Steinhauser, 2011). Alglerin teorik biyometan verimi ise 340-510 ml/g UKM arasında değişmektedir (Bohutskyi vd., 2014). Bu nedenle karışımda alg ve peynir altı suyu arttıkça biyometan verimi de artış göstermiştir.

5.5. Geliştirilen reaktörde sindirim işleminin değerlendirilmesi

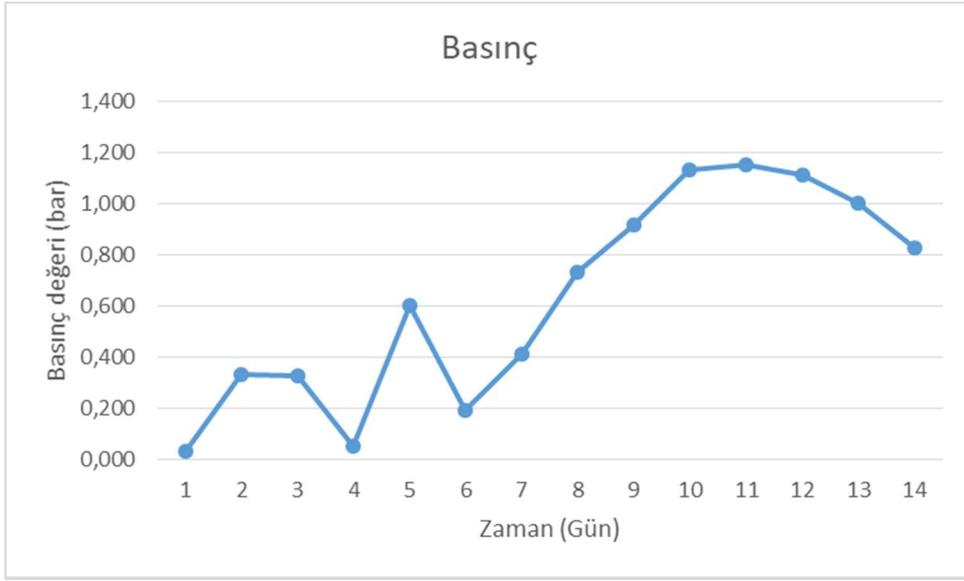
Tez kapsamında geliştirilen biyogaz reaktöründe en yüksek biyometan potansiyeline sahip olan %12 katı madde, 30:20:50 karışım oranı ve 45 °C sıcaklıkta sindirim işlemi yapılmıştır. Bu denemede de hidroliz bekleme zamanı (HRT) 12 gün olarak ayarlanmıştır. Reaktördeki karışım hacmi 30 litredir. Bu denemede otomasyon sistemine kaydedilen pH, basınç ve sıcaklık değişimleri değerlendirilmiştir.

Şekil 5.5’de reaktördeki sindirim süresince kaydedilen pH değerleri verilmiştir. İlk 2 gün içerisinde pH değeri hızla düşerken, daha sonra yükselerek 6. günden sonra stabil hale gelmiştir. İlk günlerde pH değerindeki hızlı düşüş hidroliz aşamasından asitojenizasyon aşamasına geçişte ortamda serbest yağ asitlerinin konsantrasyonunun artmasından kaynaklanmaktadır (Al Seadi vd., 2008). Asitojenizasyon aşamasında serbest yağ asitlerinin mikroorganizmalar tarafından kullanılması, bir miktar amonyak oluşumu ve sindirime NaOH eklenmesi sonucunda pH değeri yükselerek 7 seviyelerinde stabil hale gelmiştir.



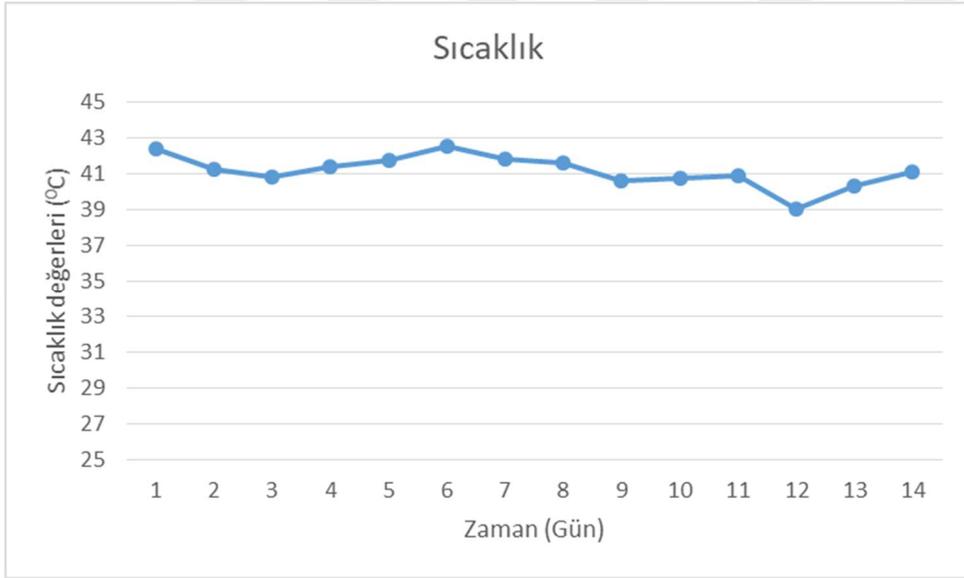
Şekil 5.5. Sindirim süresince kaydedilen pH değerleri

Kaydedilen gaz basıncı değerleri Şekil 5.6’da verilmiştir. pH değerindeki dalgalanmadan dolayı ilk günlerde gaz basıncı düşük iken, sistem dengeye ulaştığında gaz basıncında düzenli bir artış olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6. Biyogaz reaktörü kaydedilen basınç değişimi değerleri

Reaktörde gaz toplanma bölgesinde kayıt edilen ortalama gaz sıcaklığı 41,14 °C dolayında olmuştur (Şekil 5.7). Gaz sıcaklıkları sindirim süresince 39 °C ile 43 °C arasında değişim göstermiştir.



Şekil 5.7. Biyogaz reaktörü kaydedilen gaz toplanma bölgesi sıcaklık değerleri

Sindirim sürecinin sonucunda üretilen toplam biyogazda ki biyometan oranı %55,22 olarak ölçülmüştür.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamındaki biyogaz denemelerinde kullanılmak üzere, biyogaz üretim için gerekli olan parametreleri kayıt ve kontrol edebilen otomasyonlu, 300 mm reaktör çaplı ve 680 mm efektif yüksekliği olan bir biyogaz reaktörü tasarlanarak imal edilmiş ve denemelerde etkin ve başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Anaerobik sindirimde süt sığırı gübresi, yosun (makroalg) ve peyniraltı suyunun farklı sindirim sıcaklığı, katı madde oranları ve karışım oranlarında kullanarak elde edilecek biyometan miktarlarının ve en uygun karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla denemeler gerçekleştirilmiştir.

Laboratuvar ölçekli anaerobik sindirim denemeleri, laboratuvar ortamında 1 litrelik cam sindiriciler de, kesikli anaerobik sindirim yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Denemeler gübre, yosun ve peyniraltı suyu materyallerinin 3 farklı karışım oranı, 2 farklı katı madde oranı ve 4 farklı sıcaklık olmak üzere 24 farklı kombinasyonda kurulmuştur. Denemeler sonucunda en yüksek biyometan üretim potansiyeli 149,12 ml/g KM ile %12 katı madde oranı, 30:20:50 karışım oranı, 45 °C sıcaklıkta elde edilmiştir. Tüm denemelerde edilen biyogazın biyometan (CH₄) içeriği %51,02 ile %59,66 arasında değişmektedir. Düşük biyogaz üretimine karşın en yüksek metan (CH₄) verimi, %59,66 ile katı madde oranı %10, 50:30:20 karışım oranı ve sindirici sıcaklığı 30 °C olan örnekte bulunmuştur.

Katı madde oranı ve sıcaklığın metan verimi üzerinde anlamlı bir etkileri bulunamamıştır. Daha önce de belirtildiği gibi anaerobik sindirimin sadece mezofilik sıcaklık koşullarında yapılması ve katı madde oranları arasındaki farkın fazla olmaması (%10-12), katı madde ve sıcaklık etkilerinin daha belirgin olarak ortaya çıkmasını bir ölçüde engellemiştir. Ancak, karışım oranları biyometan verimini önemli ölçüde etkilemiştir. Peynir altı suyu ve algerin biyometan verimleri yüksek olduğundan karışım içindeki oranları arttıkça biyometan verimi de artmıştır.

Bu tez kapsamında imalatı yapılan 30 litre kapasiteli otomasyonlu reaktörde gerçekleştirilen anaerobik sindirim denemelerinde, laboratuvar ölçekli denemeler sonucunda belirlenen, en yüksek biyogaz üretimine sahip karışım olan kuru madde oranı %12, karışım oranı 30:20:50 ve sindirici sıcaklığı 45 °C olan karışım içeriği kullanılmıştır. Denemeler

laboratuvar ölçekli denemelerle aynı süre boyunca sürdürülmüştür. Sindirim sürecinin sonucunda üretilen toplam biyogazda biyometan oranı %55,22 olarak ölçülmüştür.

Biyogaz kullanımı küresel ısınmanın en önemli sorumlularından sera gazı emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyogaz üretiminin artması enerji tarımının geliştirilmesinin önemli bir parçasıdır. Bu çiftçiler için yeni bir gelir kaynağı olacaktır. Anaerobik sindirimin son ürünü olarak ortaya çıkan sindirilmiş artık maddenin toprak gübrelenmesinde kullanılması çevresel yararları ve finansal kaynakların korunmasının yanı sıra enerji tüketimini de azaltacaktır.

Çalışmada, makro alglerin, tarımsal atıklar ile birlikte sindirilmesinden biyogaz üretiminin, geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, çevresel açıdan değerli bir katkı sağlayacağını görülmektedir. Deniz makro alglerinin hazır bulunabilirliği ve iyi bozunma potansiyelleri, onları biyometan üretimi için umut verici bir seçim haline getirmektedir. Uygun koşullarda, denizdeki makroalgal biyokütle, ekosistem üzerinde aşırı olumsuz etkiler olmadan biyogaz üretimi için sürdürülebilir bir katkı sağlayabilir.

Anaerobik sindirim doğa dostu, çevresel yararları optimize edilmiş ve ekonomik olarak verimli olmalıdır. Yüksek kaliteli hammaddenin temini optimum gaz verimi elde etmek için vazgeçilmez bir ön koşuldur. Biyogaz üretiminde konvansiyonel anaerobik sindirim yerine, organik maddelerin birlikte sindirim tekniğinin (ko-fermantasyon) uygulanması ile anaerobik sindirimde değişik materyallerin kullanılmasını sağlayarak, sindirim hammaddelerini çeşitlendirecek ve verimliliği arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- Abdallah, M., Shanableh, A., Adghim, M., Ghenai, C. ve Saad, S. (2018). Biogas Production from Different Types of Cow Manure, *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, DOI: 10.1109/ICASET.2018.8376791.
- Akunna, J.C. (2019). Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants, *CRC Press Taylor & Francis Group*, Boca Raton, FL, USA., 2019.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. ve Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*, 1st ed., University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, Denmark, 2008.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Janssen, R. ve Drog, B. (2013). *Biomass resources for biogas production*, in: A. Wellinger, J. Murphy, D. Baxter (Eds.), *Biogas Handb.*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2013: pp. 19–46.
- Anonim, (2017). <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx>, 13.02.2017
- Anonim,(2020a).<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>, 04.11.2020.
- Anonim,(2020b). <https://enerji.gov.tr/enerji>, 04.11.2020.
- Anonim,(2020c). <https://www.enerjiatlası.com/biyogaz/>, 25.11.2020.
- Antonelli, J., Lindino, C. A., Rodrigues de Azevedo, J.C., Melegari de Souza, S. N., Cremonez, P. A. ve Rossi, E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey, *Revista de Ciências Agrárias*, 2016, 39(3): 463-467.
- Ardıç, İ. ve Taner, F. (2004). Tavuk Gübresindeki Katı Maddenin Sudaki Çözünürlüğüne Asidik Önışlemlerin Etkileri, *Ekoloji dergisi*, 14 (53): 39-43.
- Arıcı, Ş. (2009). *Biyogaz üretiminde farklı tarımsal atıkların birlikte fermentasyonunun biyokimyasal parametreler açısından incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir.

- Ayhan, A., (2013). *Farklı Karışım Oranlarındaki Sığır Gübresi Ve Mısır Silajından Mezofilik Fermantasyonla Üretilebilecek Biyogaz Miktarlarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma*, Uludağ Üniversitesi, FenBilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı Doktora Tezi.
- Bachmaier, H., Bayer, K., Gronauer, A., Friedl, G., Rauh, S. ve Pahl, H. (2009). *Treibhausgasemissionen der Energieproduktion aus Biogas*, (2009). www.biogas-forum-bayern.de.
- Bohutskyi, P., Betenbaugh, M.J. ve Bouwer, E.J. (2014). Bioresource Technology The effects of alternative pretreatment strategies on anaerobic digestion and methane production from different algal strains, *Bioresource Technology* 155 (2014) 366–372.
- Bouallagui, H., Cheikh, R. B., Marouani, L. ve Hamdi M. (2003). Mesophilic Biogas Production From Fruit And Vegetable Waste In A Tubular Digester, *Bioresource Technology* 86, 85–89
- Bölen Türkmen, H. (2019). *Detailed Renewable Energy Systems Analysis-The Case Of Turkey In Years 2023 And 2053*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi.
- Budiyono, I.N. Widiyasa, Seno Johari ve Sunarso (2014). Increasing Biogas Production Rate from Cattle Manure Using Rumen Fluid as Inoculums, *International Journal of Science and Engineering*, Vol. 6(1)2014:31-38.
- Budiyono, Widiyasa IN, Johari S, Sunarso (2010). The Kinetic of Biogas Production rate from Cattle Manure in Batch Mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*. 2010;3(1):40-4.
- Casey, T.J. (1986). Requirements and Methods for Mixing in Anaerobic Digesters. *Anaerobic Digestion of Sewage Sludge and Organic Agricultural Wastes*, London: Elsevier Applied Science Publisher, 90-103.
- Cheng, J.J. (2010). Anaerobic Digestion for Biogas Production, in: J. Cheng (Ed.), 2010. *Biomass to Renewable Energy Process.*, 1st ed., CRC Press Taylor & Francis Group, London, UK, 2010: pp. 151–208.
- Çakmak, E. K. (2019). *Enzimatik Ön Arıtım İle Mikroalglerden Biyogaz Üretiminin Arttırılması*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.

- Çalhan, R. (2017). *Büyükbaş Hayvan Gübresi, Peyniraltı suyu ve Tavuk Gübresinin Kofermentasyon Yöntemi ile Biyogazlaştırılması*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Carlini M., Castellucci, S. ve Moneti M. (2015). Biogas production from poultry manure and cheese whey wastewater under mesophilic conditions in batch reactor, *Energy Procedia* 82 (2015) 811 – 818.
- Çeken, H.B. (1997). *Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Afyon.
- Demir, İ. (1993). *Hayvan Atıklarından Biyogaz Eldesi*. Türk Devletleri Arasında 2. İlimi İşbirliği Konferansı, pp179-186, 2-3 Kasım, Kazakistan.
- Demirer, G.N., Duran, M., Ergüder, T.H., Güven, E., Uğurlu, Ö. ve Tezel, U. (2001). Anaerobic Treatability and Biogas Production Potential Studies of Different Agro-Industrial Wastewaters in Turkey. *Biodegradability II*: 401- 405.
- Deublein, D. ve Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011.
- Durmuş, A. (2009). *Prototip Bir Biyogaz Reaktörünün Otomasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir.
- Ertem, F. C., Neubauer, P. ve Junne, S. (2017). Environmental Life Cycle Assessment Of Biogas Production From Marine Macroalgal Feedstock For The Substitution Of Energy Crops. *Journal of Cleaner Production* 140, 977-985.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A. ve Pirozzi, F. (2012). Bio-Methane Potential Tests to Measure the Biogas Production from the Digestion and C0-Digestion of Complex Organic Substrates. *The Open Engineering Journal*, 2012, 5, 1-8.
- Evans, A., Strezov, V. ve Evans, T. (2015). Anaerobic Digestion, in: W. Strezov, T.J. Evans (Eds.), 2015. *Biomass Processing Technologies*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA., 2015: pp. 178–209.

- Fernandez, A.V., Vargas, G., Alarcon, N. ve Velasco, A. (2008). Evaluation of marine algaeas a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system. *Biomass and Bioenergy* 32:338–344
- Ge X., Xu, F., Li, Y. (2016). Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: recent progress and perspectives, *Bioresour Technol.* 205 (2016) 239–249.
- Gerardi, M.H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
- Ghaly, A.E. (1996). A Comparative Study of Anaerobic Digestion of Acid Cheese Whey and Dairy Manure in a Two Stage Reactor. *Bioresource Technology* 58: 61-72.
- Hublin A., Zokić T. I. ve Zelić B. (2012). Optimization of Biogas Production from Co-Digestion of Whey and Cow Manure, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, 17(6), 1284–1293.
- IEA Bioenergy. (2005). Biogas Upgrading and Utilization. Task 24; *Energy from Biological Conversion of Organic Waste*, Report, 4-18.
- Jameel, H., Keshwani, D.R., Carter, S.F. ve Treasure, T.H. (2010). Thermochemical Conversion of Biomass to Power and Fuels, in: J. Cheng (Ed.), *Biomass to Renew. Energy Process.*, Taylor & Francis Group, London, UK, 2010: pp. 437–490.
- Karabulut, A. ve Canbolat, Ö. (2005). *Yem değerlendirme ve analiz yöntemleri*. Uludağ Üniversitesi, Yayın No: 2.05.048.0424, Bursa, 520 s.
- Karahasanoğlu, F. (2006). Türkiye Biyoyakıt Potansiyeli Ve Son Gelişmeler (dektmk.org.tr)
- Kassim, R.D. M.A., Syakir, M.I. ve Sri Aprila, N.A. (2016). Irradiation Pretreatment of Tropical Biomass and Biofiber for Biofuel Production, in: W.A. Monterio (Ed.), *Radiat. Eff. Mater.*, First, 2016: pp. 328–356.
- Kavacık, B. ve Topaloğlu B. (2007). *Peynir Altı Suyu Ve Gübre Karışımından Biyogaz Üretimi* 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi Yaşam Çevre Teknoloji 24-27 Ekim – İzmir

- Kayisoğlu, B., Aktas, T. ve Durgut, M.R. (2014). *Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi İçin Küçük Kapasiteli Biyodizel Sisteminin Geliştirilmesi*, Namık Kemal Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri, NKUBAP.00.24.AR.13.18.
- Kayisoğlu, B. (2017). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ders Notları, Tekirdağ.
- Kim, J., Park, C., Kim, T.H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.W. ve Lee, J. (2003). Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge, *J. Biosci. Bioeng.* 95 (2003) 271–275.
- Koçer, A. T. ve Özçimen, D. (2018). Investigation of the biogas production potential from algal wastes. *Waste Management & Research*, vol.36(11) 1100 – 1105.
- Korres, N.E. ve Nizami, A.S. (2013). Variation in anaerobic digestion, in: K. Nicholas E., P. O’Kiely, J.A.H. Benzie, J.S. West (Eds.), *Bioenergy Prod. by Anaerob. Dig.*, Taylor & Francis Group, Oxon, 2013: pp. 194–230.
- Kossmann, W. ve Pönitz U. (1999). Basics Volume I, Information and Advisory Service on Appropriate Technology (ISAT), *GATE in Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*, GmbH, Eschborn, Federal Republic of Germany.
- Lee, S.R., Cho, N.K. ve Maeng, W.J. (1995). Using the Pressure of Biogas Created During Anaerobic Digestion as the Source of Mixing Power, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 80 (4): 415-417.
- Liu, C.F., Yuan, X.Z., Zeng, G.M., Li, W.W. ve Li, G. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 882–888.
- Marquez, G. P. B., Takeuchi, H., ve Hasegawa, T. (2015). Biogas Production of Biologically and Chemically-pretreated Seaweed, *Ulva spp.*, under Different Conditions: Freshwater and Thalassic, *Journal of the Japan Institute of Energy* , 94, 1066-1073.
- McNamara, C.J., Anastasiou, C.C., O’Flaherty, V. ve Mitchell, R. (2008). Bioremediation of Olive Mill Wastewater, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 61: 27-134.

- Milledge, J. J., Nielsen, B.V. , Maneein, S. ve Harvey, P. J. (2019). A brief review of anaerobic digestion of algae for bioenergy - *Energies*, 2019, 12, 1166, doi:10.3390/en12061166.
- Monlau, F., Latrille, E., Barakat, A., Steyer, J.P. ve Carrere, H. (2011). Impact of Various Thermo Chemical Pretreatments on Solubilization and Methane Production of Sunflower Stalks, Proceedings of the International IWA-Symposium on Anaerobic Digestion of Solid *Waste and Energy Crops*, Vienna, Austria, August 29-September 2.
- Montingelli, M. E., Tedesco, S. ve Olabi A. G. (2015). Biogas production from algal biomass: A review Renewable and Sustainable *Energy Reviews* 43961–972
- Morsünbül Parmaksız, T. (2020). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilirliklerinin önceliklendirmesi: çoklu kriterli karar verme yaklaşımı*, 2020, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Nandi, R., Saha, C. K., Huda, M. S. ve Alam M. M. (2017). Effect Of Mixing On Biogas Production From Cow Dung. *Eco- friendly Agril. J.* 10 (02):07-13.
- Nges, I.A., Liu, J. (2010). Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions, *Renew. Energy.* 35 (2010) 2200–2206.
- Olojede, M. A, Ogunkunle, O. ve Ahmed, N. A. (2018). Quality of optimized biogas yields from co-digestion of cattle dung with fresh mass of sunflower leaves, pawpaw and potato peels, *Cogent Engineering* (2018), 5: 1538491.
- Ostrem, K., Milltath, K. ve Themelis, L. (2004). Combining Anaerobic Digestion and Waste-to-Energy, *ASME.* (2004) 265–271.
- Öztürk, M. (2005). *Hayvan Gübresinden Biogaz Üretimi*, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşarlığı, Ankara.
- Rafael Ramírez-Arpide, F., Demirer, G. N., Gallegos-Vazquez, C., Hernandez-Eugenio, G., Horacio Santoyo-Cortes, V. ve Espinosa-Solares, T. (2018). Life Cycle Assessment Of Biogas Production Through Anaerobic Codigestion Of Nopal Cladodes And Dairy Cow Manure. *Journal of Cleaner Production* 172 , 2313-2322.

- Romano, R.T. ve Zhang, R. (2008). Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor, *Bioresour. Technol.* 99 (2008) 631–637.
- Sabuncu, C.Ö. (2010). *Biyogaz Üretiminin Teknik, Ekonomik ve Çevresel Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Sawyer, N., Trois, C. ve Workneh, T. (2019). Identification and characterization of potential feedstock for biogas production in South Africa, *J. Ecol. Eng.* 20 (2019) 103–116.
- Sevda, S., Pant, D. ve Singh, A. (2013). Biomethane production with reference to land-use change, in: N.E. Korres, P. O’Kiely, J.A.H. Benzie, J. W.S. (Eds.), *Bioenergy Prod. by Anaerob. Dig.*, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013: pp. 30–45.
- Shin, S. R., Lee, M.K., Im, S. ve Kim, D.H. (2019). Effect of seaweed addition on enhanced anaerobic digestion of food waste and sewage sludge, *Environ. Eng. Res.* 2019; 24(3): 449-455
- Song, Y.C., Kwon, S.J. ve Woo, J.H. (2010). Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge, *Water Environ. Res.* 38 (2010) 1553–1662.
- Sözer, S. ve Yıldız, O. (2006). Sığır Gübresi Ve Peynir Altı Suyu Karışımlarından Biyogaz Üretimi Üzerine Bir Araştırma, *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 19(2),179-183.
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü. ve Şenol, M. (2017a). 2016’da Türkiye’de Kanatlı Hayvanlardan Üretilebilecek Biyogaz ve Elektrik Enerji Potansiyeli, *BEÜ Fen Bilimleri* 6(1), 1-11.
- Şenol, H., Elibol, E. A., Açikel, Ü. ve Şenol M. (2017b). Türkiye’de Biyogaz Üretimi İçin Başlıca Biyokütle Kaynakları, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92, 2017
- Tatarchenko, O. (2011). *Assessment Of Macroalgae Harvesting From The Baltic Sea From An Energy Balance Perspective*, Master of Science Thesis, Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, 2011/43.

- Tınmaz Köse, E. (2017). Trakya Bölgesinde Hayvan Gübrelerinin Biyogaz Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi Ve Sayısal Haritaların Oluşturulması *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 23(6), 762-772.
- Walsh, J.L., Ross, C.C., Smith, M.S. ve Harper, S.R. (1989). Utilization of Biogas, *Biomass*, 20: 277-290.
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J. ve Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change, *Nat. Commun.* 1 (2010).
- Yadvika, S., Sreekrishnan, T.R., Kohli, S. ve Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review, *Bioresour. Technol.* 95 (2004) 1–10.
- Yıldız, Ş., Balahorli, V. ve Sezer, K. (2010). Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi (Biyometanizasyon) Projesi, *Su ve Çevre Dergisi*, 33:90-105.
- Zabed, H. M., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhang, Y. ve Qi, X. (2020). Biogas From Microalgae: Technologies, Challenges And Opportunities, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 117,109503, January 2020.
- Zhang, Z., Zhang, G., Li, W., Li, C. ve Xu, G. (2016). Enhanced Biogas Production From Sorghum Stem By Co-Digestion With Cow Manure *International Journal Of Hydrogen Energy* 41, 9153 -9158.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında İstanbul’da doğmuş olan Figen TAŞCI DURGUT; ilkokul, ortaokul ve lise eğitimini İstanbul’da tamamlamıştır. 2006 yılında Trakya Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümünden birincilikle mezun olmuş ve aynı yıl Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Biyosistem Mühendisliğinde lisansüstü eğitimine başlamıştır. 2008 yılından itibaren lisansüstü eğitimi sürecinde Tübitak, Santez, Avrupa Birliği Projeleri ve Bilimsel Araştırma Projelerinde görev almış ve almaya devam etmektedir. 2016 yılında Namık Kemal Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi Profdan Otomasyon Danışmanlık Araştırma ve Geliştirme A.Ş.’inde Ar-Ge Müdürü olarak görev yapmıştır. 2019 yılından itibaren Namık Kemal Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Bölgesi’nde Proje Koordinatörü olarak görevini sürdürmektedir.