



GİRESUN
ÜNİVERSİTESİ



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KIRMIZI KALİFORNİYA SOLUCANINDAN ELDE
EDİLEN GÜBREİN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**Ersin TEKE
172114005**

2021

GİRESUN

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KIRMIZI KALİFORNİYA SOLUCANINDAN ELDE
EDİLEN GÜBRENİN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Ersin TEKE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31.08.2021

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği ABD

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özlem TUNÇ DEDE

**Haziran 2021
GİRESUN**

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KIRMIZI KALİFORNİYA SOLUCANINDAN ELDE
EDİLEN GÜBRENİN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ersin TEKE

Enstitü Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Bu tez 25/08/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Banu İKİZLER
Jüri Başkanı**

**Doç. Dr.
Özlem TUNÇ DEDE
Üye**

**Dr. Öğr. Üyesi
Halil ŞENOL
Üye**

**Doç. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ersin TEKE

../../20

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalışması boyunca bana yol gösteren, danışmanlık eden, desteğini ve yardımını esirgemeyen, bilgi birikimini ve laboratuvarını benimle paylaşan, bu tezi bitirebilmemde bana çok büyük katkısı olan çok değerli hocam Doç.Dr. Özlem TUNÇ DEDE'ye, yine bilgisini ve fikirlerini benimle paylaşan Dr.Öğr.Üyesi Halil ŞENOL'a çok teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlayabilmemde çok büyük destek olan ve varlığını her zaman hissettiğim sevgili eşim Zeynep TEKE'ye, annem Türkan TEKE'ye, babam Mustafa TEKE'ye, abim Eray TEKE'ye, ablam Hürmüs TEKE'ye, kardeşim Uğurcan TEKE ve Berna ÖZDEMİR'e, arkadaşlarım Olkan İSMİ, Fırat IŞIK, Aykut AKAY ve Abdülsamet KAYA'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
3.1. Biyogaz	1
3.2. Biyogaz Üretiminin Aşamaları	4
3.2.1. Hidroliz	5
3.2.2. Asit Oluşumu	6
3.2.3. Asetat Oluşumu.....	6
3.2.4. Metan Oluşumu.....	6
3.3. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler.....	6
3.3.1. Oksijen	6
3.3.2. Sıcaklık	7
3.3.3. pH Değeri	8
3.3.4. C/N Oranı	9
3.3.5. Hidrolik Bekleme Süresi ve Organik Yükleme Hızı.....	9
3.3.6. Karıştırma	10
3.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar ve Karakteristikleri	10
3.4.1. Bitkisel Atıklar	10
3.4.2. Kentsel ve Endüstriyel Atıklar	11
3.4.3. Hayvansal Atıklar.....	11
3.5. Solucan Gübresi	11

3.5.1.	Solucan Gübresinin Özellikleri.....	13
3.5.2.	Solucan Gübresi Üretim Sistemleri	14
3.5.2.1.	Mezar Sistemi	14
3.5.2.2.	Sürekli Akış Sistemi (SAS)	15
3.5.2.3.	Kasa Sistemi.....	15
3.6.	Biyogaz Değerlendirmesi.....	16
3.7.	Biyogaz Üretiminin Yararları.....	17
3.8.	Biyogaz Kullanım Alanları	18
3.8.1.	Biyogazın ısıtma amacıyla kullanılması	18
3.8.2.	Biyogazın aydınlatma amacıyla kullanılması	18
3.8.3.	Biyogazın araç motorlarında kullanılması	18
3.9.	Türkiye’de Biyogaz	19
BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ.....		22
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM		27
3.1.	Deneyde Kullanılan Organik Maddeler	27
3.2.	Yapılan Analizler.....	28
3.2.1.	Toplam Katı Madde (TKM) Tayini.....	28
3.2.2.	Toplam Uçucu Katı Madde (UKM) Tayini	29
3.2.3.	Toplam İnorganik Madde (TİM) Tayini	29
3.2.4.	pH ve Sıcaklık Ölçümleri.....	30
3.2.5.	Biyogaz Üretim Sistemi	30
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI		33
4.1.	pH ve Sıcaklık Ölçümleri.....	33
4.2.	Kümülatif Biyogaz Üretim Miktarları	37
4.3.	Biyogaz Üretimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	39
4.4.	Üretilen Biyogazın Nitelik Belirleme Çalışmaları.....	41
4.5.	Matematiksel Modelleme Çalışmaları	41
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ		50
KAYNAKLAR		53
ÖZGEÇMİŞ		57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A : Maksimum biyogaz üretim miktarı (mL/g KM)

C/N : Karbon Azot Oranı

CH₄ : Metan

CO₂ : Karbondioksit

g : Gram

GWh : Gigawatt saat

H₂ : Hidrojen

H₂O : Su

H₂S : Hidrojen Sülfür

K : Potasyum

Kcal : Kilo kalori

Kg : Kilogram

L : Litre

m³ : Metreküp

MJ : Megajoule

mL : Mililitre

MW : Megawatt

N : Azot

NaOH : Sodyum Hidroksit

NH₃ : Amonyak

O₂ : Oksijen

°C : Santigrat derece

P : Fosfor

Ppm : milyonda bir (parts per million)
 λ : Gecikme süresi (gün)
 μ_m : Spesifik biyogaz üretim hızı (mL/g KM.gün)
AB : Avrupa Birliği
BEPA : Biyokütle enerjisi potansiyeli atlası
CBS : Coğrafi bilgi sistemi
CNG : Sıkıştırılmış doğal gaz (Compressed Natural Gas)
KM : Katı madde
LPG : Sıvılaştırılmış petrol gazı (Liquified Petroleum Gas)
SAS : Sürekli akış sistemi
SG : Solucan gübresi
TEP : Ton eşdeğer petrol
TG : Tavuk gübresi
TKM : Toplam katı madde (mg/L)
UKM : Uçucu katı madde (mg/L)
TİM : Toplam inorganik madde (mg/L)
TOM : Toplam organik madde (mg/L)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Biyogaz şeması [2].....	2
Şekil 1.2. Biyogaz üretim aşamaları [9].....	5
Şekil 1.3. Mezar Sistemi [19].....	14
Şekil 1.4. Sürekli Akış Sistemi [20].....	15
Şekil 1.5. Kasa Sistemi [21].....	16
Şekil 1.6. Türkiye’de İllere Göre Biyokütle Potansiyel Dağılımı [6]	21
Şekil 3.1. Deneyleerde Kullanılan Solucan Gübresi.....	28
Şekil 3.2. Deneyleerde Kullanılan pH ve Sıcaklık Ölçme Cihazı	30
Şekil 3.3. Biyogaz Üretimi İçin Tasarlanan Deney Düzenegi	31
Şekil 3.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Gaz Dedektörü Cihazı	32
Şekil 4.1. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği	34
Şekil 4.2. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği	34
Şekil 4.3. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği	35
Şekil 4.4. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği.....	35
Şekil 4.5. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği	36
Şekil 4.6. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği	36
Şekil 4.7. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi	37
Şekil 4.8. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi.....	38
Şekil 4.9. Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımı ile Biyogaz Üretimi.....	39
Şekil 4.10. Kümülatif Biyogaz Üreme Miktarları.....	40
Şekil 4.11. Birim Katı Madde İçin Oluşan Biyogaz Miktarları	41
Şekil 4.12. Logistic Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör	43
Şekil 4.13. Logistic Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör	44
Şekil 4.14. Logistic Model ile Tavuk Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi	44

Şekil 4.15. Logistic Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör.....	45
Şekil 4.16. Logistic Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör.....	45
Şekil 4.17. Gompertz Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör.....	46
Şekil 4.18. Gompertz Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör.....	46
Şekil 4.19. Gompertz Model ile Tavuk Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi ...	47
Şekil 4.20. Gompertz Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör.....	47
Şekil 4.21. Gompertz Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör.....	48

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. 1 m ³ biyogazın uygun koşullar altında etkin ısı değeri [4]	3
Tablo 1.2. Biyogaz Bileşimi [5]	3
Tablo 1.3. Biyogazın diğer genel özellikleri [6]	4
Tablo 1.4. Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Biyogaz Verimleri ve Biyogazdaki Metan Miktarları [4]	12
Tablo 1.5. Bazı Ülkelerde Biyogazın Motorlu Taşıtlarda Kullanılabilmesi İçin Biyogazdan İstenen Özellikler [23]	19
Tablo 4.1. Üretilen Biyogazların Bileşimi	41
Tablo 4.2. Büyüme eğrilerini tahmin etmede kullanılan Sigmoidal modeller ve denklemleri	42
Tablo 4.3. Modifiye edilmiş Logistic ve Gompertz modelleri	43
Tablo 4.4. Logistic modelleme yolu ile elde edilen veriler	48
Tablo 4.5. Gompertz modelleme yolu ile elde edilen veriler	48
Tablo 5.1. Deney Düzeneklerinin pH ve Sıcaklık Değişimleri	50
Tablo 5.2. Deney Düzeneklerinin Biyogaz Üretim Verimleri	51

KIRMIZI KALİFORNİYA SOLUCANINDAN ELDE EDİLEN GÜBRENİN BİYOGAZ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kırmızı Kaliforniya solucanından elde edilen gübrenin (SG) biyogaz üretim potansiyeli, tavuk gübresi (TG) ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Biyogaz üretim çalışmaları, 500 mL çalışma hacmine sahip 1 L'lik cam reaktörler içerisinde, oksijensiz ortamda (anaerobik), sabit karıştırma hızında (300 rpm), sabit sıcaklıkta (35°C) ve kesikli sistemde gerçekleştirilmiştir. Deneyler üç aşamada gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada sadece solucan gübresinin (SG), ikinci aşamada sadece tavuk gübresinin ve son aşamada ise SG+TG karışımının (kütlece 1:1) biyogaz üretim potansiyelleri incelenmiştir. Her sistemin biyogaz üretim potansiyeli suyun yer değiştirme testi ile hacimsel olarak belirlenmiştir. Üretilen biyogazların niteliği ise gaz detektörü kullanılarak belirlenmiştir. Deney süresince pH ve sıcaklık değişimi takip edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde birim kuru madde başına elde edilen biyogaz miktarları TG (114,87 mL/g KM) > SG+TG (44,2 mL/g KM) > SG (4,15 mL/g KM) olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların, modifiye edilmiş Logistic ve Gompertz modelleri uygulanarak matematiksel modellemeleri yapılmış ve SG ile TG için Logistic, SG+TG karışımı için ise Gompertz modelinin daha iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, solucan gübresinin az da olsa biyogaz üretim potansiyelinin olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, ileride SG ile yapılacak araştırmalara katkı sağlayacak niteliktedir.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, kırmızı Kaliforniya solucanı, solucan gübresi, tavuk gübresi.

THE INVESTIGATION OF THE UTILIZATION OF MANURE OBTAINED FROM RED CALIFORNIA WORM IN BIOGAS PRODUCTION

SUMMARY

In this study, the biogas production potential of vermicompost (SG) from California red worm was compared with chicken manure (TG). Biogas production studies were carried out in 1 L glass reactors with a working volume of 500 mL, in an oxygen free environment (anaerobic), at constant mixing rate (300 rpm), constant temperature (35°C) and in a batch system. The experiments were carried out in three stages. In the first stage, the biogas production potential of vermicompost (SG) were investigated. In the second stage, chicken manure (TG) and in the last stage SG+TG mixture (1:1 by weight) were investigated. The biogas production potential of each system was determined by volumetric water displacement test. The quality of the produced biogas was determined using a gas detector. During the experiment, pH and temperature changes were monitored. As a result of the studies, the biogas production amounts per unit dry mass of the manures were found as TG (114,87 mL/g KM) > SG+TG (44,2 mL/g KM) > SG (4,15 mL/g KM) from the highest amount to the least amount. The results obtained were mathematically modeled by applying the modified Logistic and Gompertz models, and while Logistic model was found to fit the most appropriate model for SG and TG, Gompertz model was the most appropriate one for SG+TG mixture.

As a result, it has been determined that vermicompost has a small biogas production potential. This study will contribute to future research to be done with SG.

Keywords: Biogas, California red worm, vermicompost, chicken manure.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerjinin pahalılaştığı ve gittikçe azaldığı bu dönemde oluşan enerji ihtiyaçları bizleri yeni arayışlara götürmüştür. Dünya üzerindeki nüfusun, çevre kirliliğinin ve tüketimin eş zamanlı olarak artmasıyla birlikte ihtiyaç duyulan çevre dostu, ekonomik enerji de artmıştır. Bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Son zamanlarda yapılan en yaygın çalışmalardan biri de yenilenebilir enerji kaynakları ile elde edilebilecek enerjidir. Fosil yakıtlarının azalmasıyla beraber yenilenebilir enerjiye ilgi daha da artmıştır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler, artan nüfus ve gelişen teknoloji ile beraber çok daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Rüzgâr, biyokütle, jeotermal, hidrolik, hidrojen ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılabilir. Bu enerji kaynaklarından biyokütle enerjisi ile biyogaz üretimi Dünya'nın çeşitli yerlerinde alternatif enerji üretimi için kullanılmaktadır. Ülkemizde de tarım ve hayvancılığın yaygın olması, biyokütle enerjisi ile biyogaz üretimi için bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

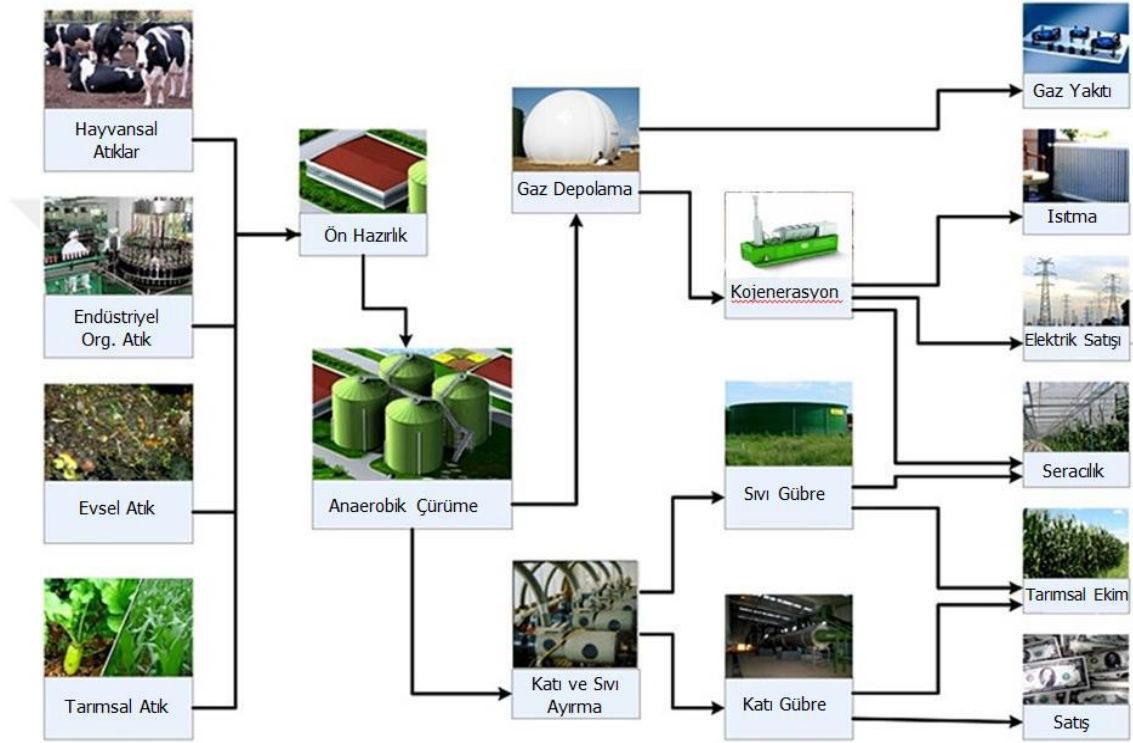
Bu çalışmada, son zamanlarda organik gübre olarak yaygın bir şekilde üretilip kullanılmaya başlanan solucan gübresinin (SG) biyogaz üretim potansiyeli araştırılmıştır.

1.1.Biyogaz

Biyogaz, oksijensiz ortamda biyokütlenin anaerobik çürümesi ile ortaya çıkan yanıcı bir gazdır. Biyogaz; hayvansal, bitkisel veya evsel atıklardan elde edilebilen bir gaz türü olarak diğer gazlardan farklıdır. Besicilikte oluşan hayvansal dışkılar, şeker pancarı veya mısır bitkileri ile gıda sanayisinde oluşan organik atıklar, hammadde ürün girdisi olarak biyogaz tesisinde kullanılabilir. Isıl değeri açısından biyogazın ana maddesini oluşturan gaz metan gazıdır. Biyogazın içeriğindeki metan gazı, karbondioksit gazına göre yaklaşık olarak 23 kat daha fazla sera etkisine neden olduğu için bitkisel, hayvansal ve endüstriyel atıklar kullanarak biyogaz elde edilmesi

yöntemi, ekonomik faydasının yanında çevreci bir uygulama olması ile ön plana çıkmaktadır [1].

Organik atıklardan biyogaz üretimi, bir yandan çevre kirliliğine sebep olabilecek atıkların bertarafını sağlarken diğer yandan atıklardan enerji elde etme açısından önemli bir atık geri kazanım modeli oluşturmaktadır.



Şekil 1.1. Biyogaz şeması [2]

Oksijensiz ortamda organik atıkların çürümesi ile meydana gelen biyogaz; havadan hafif, kokusuz, mavi renkte bir alevle yanan, renksiz, alev sıcaklığı 870 °C, oktan sayısı yaklaşık 110, yanma sıcaklığı 700 °C, yoğunluğu 1,21 kg/m³ olan gaz karışımıdır. Biyogaz, sıvı hale geçme sıcaklığı 164 °C olan ve kolaylıkla bozunmayan sabit yapıli bir gazdır [3].

Biyogazın içindeki gazların bileşimi; reaktöre yükleme hızına, sıcaklığa, reaktörün işletim şartlarına, reaktördeki maddelerin özelliklerine, hammaddenin su miktarına ve reaktördeki bakteriyel aksiyonlara bağlı olarak değişmektedir. Bu etkenler, biyogaz ile üretilen enerji miktarını da etkiler [3].

Biyogazdaki yakıt değeri, bünyesindeki etken maddelerin en önemlilerinden olan metan gazı ile ilişkilidir. Metan gazı yaklaşık olarak 8900 kcal/m³ ısııl değere sahiptir. Biyogaz ise ortalama 47005700 kcal/m³ (1725 MJ/m³) ısııl değere sahiptir. Isıl değeri, biyogaz bileşimindeki metan gazı oranına bağlı olarak değişmektedir. 1 m³ biyogazın uygun koşullar altında etkin ısııl değerleri Tablo 1.1’de verilmiştir. Biyogaz bileşimlerinin içeriğinde metan gazı oranı %50’den düşük olduğu takdirde verimli bir yanma olayı gerçekleşmez [3].

Tablo 1.1. 1 m³ biyogazın uygun koşullar altında etkin ısııl değeri [4]

Benzin	0,75 L
Motorin	0,66 L
Bütan	0,2 m ³
Propan	0,25 m ³
Odun kömürü	1,46 kg
Gazyağı	0,62 L
Kömür	0,85 kg
Odun	3,47 kg
Elektrik	4,70 kWh

Genel olarak, biyogazın bileşiminde yer alan gazlar Tablo 1.2’de ve biyogazın genel özellikleri ise Tablo 1.3’te sunulmuştur.

Tablo 1.2. Biyogaz Bileşimi [5]

Bileşendeki Gazlar	Miktarı (%)
CH ₄ -Metan	55-75
CO ₂ -Karbondiyoksit	30-45
H ₂ S-Hidrojen sülfür	1-2
N ₂ -Azot	0-1
H ₂ -Hidrojen	0-1
Karbon monoksit	Miktarı Çok Az
Oksijen	Miktarı Çok Az

Tablo 1.3. Biyogazın diğer genel özellikleri [6]

Enerji İçeriği	6.0-6.5 kWs/m³
Yakıt Eşdeğeri	0.60-0.65 L/m ³ Biyogaz
Patlama Limitleri	6-12% biyogaz (havada)
Tutuşma Sıcaklığı	700 °C
Kritik Basınç	75-89 bar
Kritik Sıcaklık	-82,5 °C
Koku	Çürük Yumurta

1.2.Biyogaz Üretiminin Aşamaları

Biyogazın oluşmasını sağlayan temel maddeler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Organik Madde
- Bakteri
- Isı
- Anaerobik (oksijensiz) ortam

Metan üreten bakterilerin ihtiyaç duyduğu besin, organik maddedir. Hayvan çiftlikleri ve tarımsal alanlar, organik maddelerin en önemli kaynağı olduğu için biyogaz üretiminde de ön plana çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, arıtma tesisi çamurları ve çöpler, biyogaz üretimi için gerekli diğer önemli kaynaklardır [7].

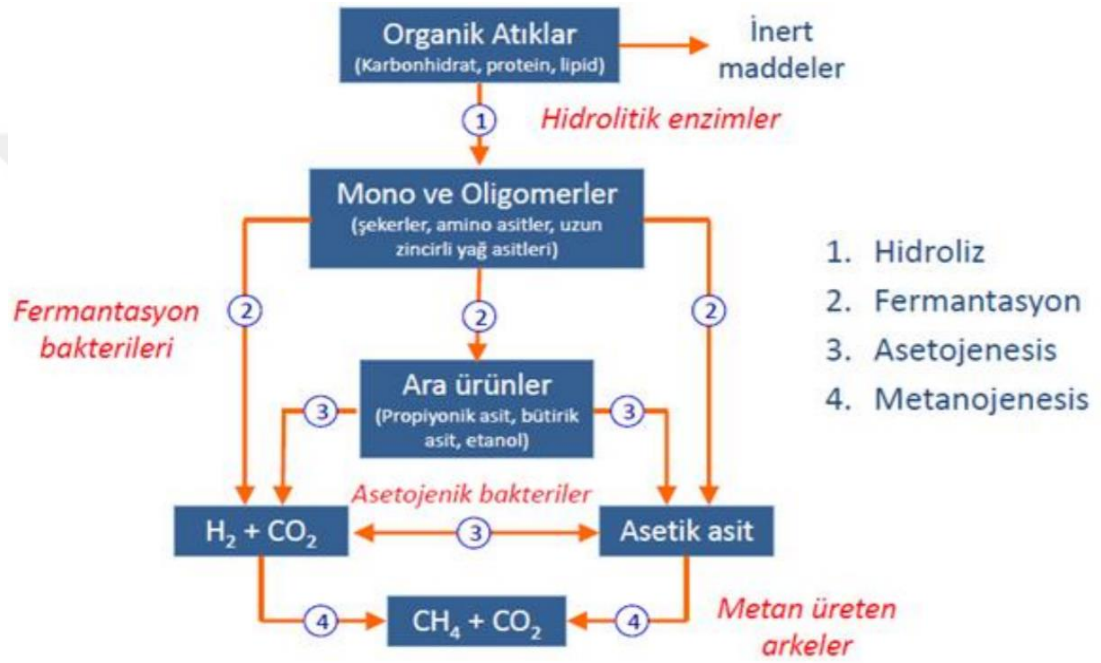
Bir dizi reaksiyon işlemi ile gerçekleşen biyogaz üretim işlemi, reaktördeki bakterilerin birbirleriyle etkileşime geçmesiyle olur. Bu işlemler sırasıyla dört aşamadan oluşur:

- 1. Aşama hidroliz,
- 2. Aşama asit oluşumu,
- 3. Aşama asetat oluşumu,
- 4. Aşama metan oluşumudur.

Bu aşamaların her birinde farklı mikroorganizmalar görev alır ve süreçteki bir reaksiyon reaksiyonda elde edilen ürün diğer bir reaksiyonun girdisidir. İlk aşama olan hidroliz tepkimesinde büyük molekül yapıdaki organik maddeler küçük molekül yapıdaki organik maddelere dönüşür. Bu organik maddeler, asit oluşumu esnasındaki

bakteriler tarafından ketonlara ve daha basit organik asitlere dönüşür. Daha sonra, karbonhidratlardan asetat elde edilir. Son olarak, metan bakterileri tarafından metan (CH_4) üretimi gerçekleşir. Biyogaz üretim sisteminin tamamı ele alındığında, aşamalar arasında ürün girdi çıktı bağlantısının olduğu, sistemin tamamının dört aşamadan oluştuğu ve bütün aşamaların eş zamanlı olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Tüm bu aşamalar ayrıntılı bir biçimde Şekil 1.2’de gösterilmiştir [8].



Şekil 1.2. Biyogaz üretim aşamaları [9]

1.2.1. Hidroliz

Reaktördeki tepkimelerin ilk adımı olan hidroliz aşamasında, su içerisinde çözünen küçük yapılı molekülleri elde etmek için daha karmaşık ve büyük yapılı organik maddelerin bileşenlerine ayırma işlemi yapılır. Örnek olarak, karmaşık yapıdaki organik maddelerin monosakkaritlere, yağ asitlerine ve amino asitlere dönüşmesi verilebilir. Mikroorganizmaların salgıladığı enzimler (amilaz, selüloz, proteaz, lipaz vb.) ile hidroliz adımı hücre dışında gerçekleşir. Enzimlerin çalışma verimliliğini etkileyen pH, ortam sıcaklığı ve hidrolik bekleme süresi gibi faktörler hidroliz aşamasının hızını belirler. Organik maddenin en ideal ölçüde hidrolize olması için hidrolik bekleme süresinin yeteri kadar uzun olması gerekmektedir [8].

1.2.2. Asit Oluşumu

Bu aşamada asit oluşturan bakteriler hidroliz aşamasından çıkan nihai ürünü organik asitlere dönüştürür. Asit oluşumunda ürün miktarı, pH ve sıcaklık gibi ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Asit oluşum bakterileri hammaddeyi genellikle kısa zincir uçucu asitlere, alkollere ve ketonlara dönüştürürler [8].

1.2.3. Asetat Oluşumu

Asit oluşumunda üretilen ürünlerden geriye kalan ürünler örneğin; bütirik asit, alkol ve propiyonik asitler asetat oluşumunu sağlayan bakteriler tarafından asetik asit, karbondioksit ve hidrojene dönüştürülürler. Hidrojen anaerobik arıtma işlemlerinde aracı rolü oynar. Lipitlerin hidroliz işlemlerinden meydana gelen uzun zincir yağ asitleri propiyonata ya da asetata oksitlenmekte ve devamında hidrojen gazı meydana gelmektedir. Normal şartlar altında, oksitlenmeyi engelleyen çözeltideki hidrojenin varlığıdır. Hidrojenin varlığı durumunda, hidrojen süpürme bakterileri hidrojeni tüketerek hidrojenin kısmi basıncını azaltır. Termodinamik olarak tepkimenin gerçekleşmesini sağlayacak kadar düşük kısmi basıncı oluşursa, asetat oluşumu meydana gelir [10].

1.2.4. Metan Oluşumu

Son adımda metan bakterileri asetat oluşum ve asit oluşum bakterilerinin ürünlerini metan gazı, karbondioksit ve suya çevirir. Metan bakterileri suda çözünen maddeleri metana çevirir. Bu bakteriler, ortam pH seviyesindeki değişikliklere karşı oldukça hassastır ve tercihen alkali ortam koşullarında canlılık gösterirler [11]. Bakteriler pH düzeyinin 6'nın aşağısında olduğu ortamlarda yaşamlarını sürdüremezler. Bütün sistemin hızını bu aşamadaki bakterilerin gelişme hızı belirler [12].

1.3. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

1.3.1. Oksijen

Geçmiş yaklaşık olarak üç veya dört milyar yıl öncesine dayanan yaşadığımız dünyanın bilinen en eski canlılarından olan metanojenik arkeler, atmosfer bile

oluşmamışken meydana gelmişlerdir. Bundan dolayı yaşam alanları oksijenin olmadığı ortamlar olan bu mikroorganizmaların pek çok çeşidi, ortamlarında bulunabilecek çok az miktardaki oksijenle bile ölebilir. Fakat genel olarak oksijenin fermentöre girişini tamamen engelleyebilmek pek mümkün değildir. Metanojenik arkelerin tamamen ölmemelerinin veya çalışmalarının hemen durmamasının sebebi, bozunma sırasında oksijen tüketen bakterilerle aynı ortamda bulunmalarıdır. Bunların bazıları fakültatif anaerobik bakterilerdir. Bu bakteriler hem oksijensiz hem de oksijenli ortamda yaşayabilirler. Ortamda az bir miktar oksijen olsa bile bu oksijen fakültatif bakteriler tarafından metanojenik arkelere zarar vermesinden önce tüketilir. Bu durum aynı zamanda, havadaki oksijenin biyolojik desülfürizasyon işlemi için fermentörün gaz bölmesine gönderilirken metan oluşumu üzerindeki olumsuz etkisini önler [13].

1.3.2. Sıcaklık

Kimyasal reaksiyonların hızı çevre ısısı ile doğru orantılıdır yani çevre ısısı yükseldikçe kimyasal reaksiyon hızı da artar. Fakat bu şartlar indirgenme ve bozunma aşamalarına tam anlamıyla uygulanmaz. Burada metabolizma işlemindeki mikroorganizmaların canlılıklarını farklı sıcaklık değerlerinde devam ettirdikleri dikkate alınmalıdır. Uygun sıcaklık değerlerinin üzerine çıkıldığında veya aşağısına inildiğinde, bu durum prosesin kesintiye uğramasına ve ilerleyen süreçte proseste bulunan mikroorganizmaların ciddi hasarlar almasına sebep olabilir. Bozunmaya giren mikroorganizmalar sıcaklık ihtiyaçları sebebiyle termofilik, sakrofilik ve mezofilik olmak üzere üç farklı grupta toplanırlar [13].

Sakrofilik mikroorganizmalar 25 °C altındaki sıcaklıklarda yaşar. Bu sıcaklığın altında fermentörün veya materyallerin ısıtılmasına gerek yoktur, fakat gaz üretimi veya bozunma performansı düşüktür. Bu sebeple ekonomik bir şekilde biyogaz tesislerinin işletilmesi mümkün değildir. Bilindiği kadarıyla metan oluşturan mikroorganizmaların büyük çoğunluğunun istediği sıcaklık ise 37 ila 42 °C aralığındadır. Uygulamada en yaygın olarak görülenler mezofilik alanda faaliyette bulunan tesislerdir. Çünkü bu sıcaklık aralığında diğerlerine göre daha yüksek miktarda gaz üretimi ve iyi bir proses aktifliği oluşabilmektedir [13].

Termofilik kültürler, materyalin temizlenmesine bağlı olarak yüksek öz ısıya sahip (örneğin proses suyu) materyale bağlı yan ürün veya atık madde olarak kullanılacaksa veya sağlığa zararlı bakteriler öldürülecekse, fermentasyon için idealdir. Fakat daha fazla enerjiye fermentasyon prosesinin ısıtılması için ihtiyaç olabileceği unutulmamalıdır. Bu sıcaklık alanında olan fermentasyon prosesi materyal beslemesindeki düzensizliklere, fermentörün çalışma tarzına ve rahatsız edici etkilere karşı hassastır, çünkü metanojenik mikroorganizmaların termofilik koşullar altında daha az çeşidi bulunmaktadır [14].

1.3.3. pH Değeri

Sıcaklık değeri için bahsettiğimiz bağlamlar pH değeri için de geçerlidir. Prosesin farklı aşamalarında bulunan mikroorganizmalar, optimum büyüyecekleri çeşitli pH değerlerine gereksinim duyarlar. Örnek olarak, asit üreten ve hidrolize eden bakteriler için ideal pH seviyesi 5.2-6.3 bandındadır. Buna karşılık, metanojik arkeler ve asetik asit oluşturan bakteriler 6.5 ila 8 arasındaki pH değerlerinde optimum seviyeye ulaşırlar. Fermentasyon işlemi yalnız bir fermentörde oluyorsa, bu duruma uygun pH bölgesi seçilmelidir [13].

Bir prosesin çok veya tek aşamalı olmasından ayrı olarak, sistemin pH değeri oksijensiz bozunma sırasında meydana gelen asitli ve alkali metabolizma ürünleri tarafından otomatik olarak düzenlenir. Prosese çok fazla organik madde, çok kısa bir sürede eklendiğinde veya başka bir nedenden ötürü metan oluşumu engellendiği takdirde, sistemin asitli metabolizma ürünleri çoğalır. pH değeri normal şartlarda nötral alandaki karbonat ve amonyak tarafından düzenlenir. Sistemin pH değeri sistemde çok fazla organik asit oluştuğunda düşer. Bundan dolayı propiyon asidinin ve hidrojen sülfürün engelleyici etkisi artar, dolayısıyla fermentörün çok kısa bir zamanda “çökmesi” söz konusu olabilir. Diğer taraftan organik azot bağlantılarının bozunmasıyla, su ile beraber amonyuma dönüşen amonyak serbest bırakıldığında da pH değeri artabilir. Yani amonyanın engelleyici etkisi yükselir. İşlem kontrolü açısından pH değerinin, sürekli kontrol edilmesinde fayda vardır [13].

1.3.4. C/N Oranı

Genel olarak organik atıkları ikiye ayırabiliriz. Bunlar azot bakımından zengin olanlar ve karbon bakımından zengin olanlardır. Biyogazın elde edilmesinde karbon önemli bir etken iken, anaerobik bakterilerin üremesi ve gelişimi bakımından azot gereklidir. Karbon elementinin en önemli kaynağını irdelleyecek olursak karbonhidratlar, azot kaynağı ise nitrat, amonyak ve proteindir. Azotun eksikliğinde hücresel gelişim engellendiği için verim düşer. Azotun fazlalığı ise NH_3 birikimine sebep olur ve pH değeri 8.5'e yaklaşır. Bu sebeple pis kokulu, yanmaya elverişsiz bir gaz ortaya çıkar. Reaktör içerisinde optimum C/N oranını korumak mühimdir. Genelde mikroorganizmalar azottan 25-30 kat daha fazla oranda karbon kullanırlar. Bu nedenle anaerobik çürütücü için 25-30:1 karbon-azot oranı en uygundur [15].

1.3.5. Hidrolik Bekleme Süresi ve Organik Yükleme Hızı

Atığın reaktörde bekletildiği süreye hidrolik bekletme süresi denir ve reaktör ekonomisini belirlemekte etkin rol oynayan önemli bir faktördür. En uygun zaman; proses sıcaklığı, tepkimeye giren madde içeriği, kullanılan reaktörün tasarımına ve çevre koşullarına bağlıdır. Bu faktörlerin tamamı göz önünde bulundurularak bekleme süresi belirlenmelidir. Bekleme süresi, sıcaklığın değişmesine bağlı olarak mevsimden mevsime veya reaktöre giren maddenin değişmesine bağlı olarak günden güne farklılaşabilir. Hidrolik bekletme süresi, reaktörün tasarımına ve girdilerin katı bileşenlerine bağlı olarak minimum 40 gündür. Termofilik sıcaklık değerlerinde hidrolik bekletme süresi 15-20 gün arasında olabilir. Soğuk iklim koşullarında hidrolik bekletme süresi 100 güne kadar çıkarılabilir. Reaktörlere günlük olarak ilave edilen uçucu katıların miktarı organik yükleme oranı veya organik yükleme hızı olarak ifade edilir. Reaktörün ve organik hammaddenin boyutuna ve türüne bağlı olarak değişen organik yükleme hızı biyometan üretim potansiyelini büyük oranda etkilemektedir. Metan üretim miktarı organik yükleme hızının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Anaerobik çürüme esnasında tahmini olarak 40-50% uçucu katı giderilir. Organik yükleme hızının yüksek olması reaktörün pH değerini düşürür ve buna bağlı olarak sistem inhibe olur. Bunun sebebi hidrojeni yeterli hızda uzaklaştıramayan metan bakterilerine karşı baskın hale gelen asit bakterilerinin, uçucu organik asit üretimini

arttırması sonucu oluşan asit birikimidir. Bu durum da sistemin dengesini bozar. Reaktöre tek çeşit hammadde ilave etmenin genel anlamda daha verimli bir performans sağladığı görülmüştür [15].

1.3.6. Karıştırma

Karıştırma, anaerobik reaktörlerin faaliyetlerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Reaktör içerisindeki substratın karıştırılması ile birlikte mikroorganizmalar homojen bir şekilde dağılır ve bununla beraber ısı geçişi sağlanır. Karıştırma, çamur geri döngüsüyle, biyogaz geri devri ile veya mekanik karıştırıcılarla iyi bir şekilde yapılabilir.

Karıştırmanın önemini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Taze atık ile bakteri popülasyonunun iç içe karışımını sağlayarak reaksiyonu hızlandırmak.
- Metanogenisler tarafından üretilen biyogazın çıkışını kolaylaştırmak.
- Reaktördeki atığın sıcaklık dağılımını dengelemek.
- Fermantasyon esnasında atığın üst kısmındaki köpük oluşumunu ve atık içerisinde bulunan ufak partiküllerin reaktörün taban kısmına çökmesini engellemek.

1.4.Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar ve Karakteristikleri

Biyogaz üretiminde önemli olan organik madde yoğunluğu ve kalitesidir. Özellikle yüksek nemli ve katı organik atıklar bolca kullanılır. Bununla birlikte organik madde yoğunluğu fazla olan atık sular da biyogaz üretiminde kullanılabilir.

1.4.1. Bitkisel Atıklar

Bitkisel atıkların en önemlileri; buğday, ince kıyılmış sap, mısır atıkları, saman, anız, çimen ve şeker pancarı yaprakları gibi tarımsal ürünlerin işlenmemiş atık kısımlarıdır. Bitkisel atıkların kullanıldığı tesislerde, proses kontrolünün çok dikkatli bir şekilde yapılması önerilmektedir. Bu nedenle, düzgün bir proses kontrol sağlanmadan, özellikle kırsal bölgelerde bitkisel atıklardan yapılan biyogaz üretimi pek önerilmemektedir [4].

1.4.2. Kentsel ve Endüstriyel Atıklar

Kentsel ve endüstriyel alanda deri, tekstil, kağıt, gıda, şeker endüstrisi (fabrika) atıkları, kanalizasyon ve dip çamurları vb. gibi birçok atık çeşidi bulunmaktadır. Özellikle büyük sanayi tesisleri ve belediyeler tarafından elde edilen atıklar, biyogaz üretiminde kullanılmaktadır. Ancak, bu atıklar ağır metal ve yoğun toksik maddeler içerdiklerinden diğer uygulamalara göre çok daha karmaşıktır [3].

1.4.3. Hayvansal Atıklar

Hayvansal atıkların biyogaz üretiminde önemi oldukça büyüktür. Biyogaz üretiminde yaygın olarak kullanılan atıklar; at, sığır, domuz, tavuk, koyun, gibi hayvanların dışkıları, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işlenmesi ile ortaya çıkan atıklardır. Tablo 1.4.'te çeşitli atıkların biyogaz verimleri ve metan oranları verilmiştir. Bu tez çalışmasında, hayvansal atıklardan TG, SG ile karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. Literatürde, TG'nin kuru madde bazında toplam organik madde içeriği %63-72 aralığında, organik karbon içeriği ise %28-37 aralığında verilmektedir [16].

1.5.Solucan Gübresi

Solucan gübresi (vermikompost), çeşitli organik atıkların bir takım toprak solucanları tarafından sindirmeleri sonucu kompostlaştırılmış ürünüdür. Evsel meyve sebze atıkları, hayvan dışkısı, bahçe yaprak atıkları, saman, sap, atık kağıt, talaş vb. atıklar bu işlemde hammadde olarak kullanılabilir. SG; toprak düzenleyici ve tarımsal endüstride organik gübre olarak kullanılır [17].

Yeryüzünde binlerce solucan türü varken, SG üretimi için yalnızca birkaçı kullanılır. Genel olarak bütün sebze meyve atıkları üzerinde gelişebilen bu türler, kendi ağırlıklarına yakın günlük atık tüketebilmektedirler. Sayılarını uygun ortam koşullarında her 40 günde bir ikiye katlayıp nüfuslarını arttırabilirler [17].

Tablo 1.4. Çeşitli Kaynaklardan Elde Edilen Biyogaz Verimleri ve Biyogazdaki Metan Miktarları [4]

Kaynağı	Metan Oranı (Hacim, %)	Biyogaz Verimi (Litre/kg)
Kanatlı Gübresi	60	310 - 620
Domuz Gübresi	65 - 70	340 - 550
Sığır Gübresi	65	90 - 310
Arpa Samanı	59	290 - 310
Buğday Samanı	50 - 60	200 - 300
Çavdar Samanı	59	200 - 300
Keten & Kenevir	59	360
Çimen	70	280 - 550
Mısır Sapları ve Artıkları	59	380 - 460
Ziraat Artıkları	60 - 70	310 - 430
Sebze Artıkları	Değişken	330 - 360
Dökülmüş Ağaç Yaprakları	58	210 - 290
Yerfıstığı Kabuğu	-	365
Atık Su Çamuru	65 - 80	310 - 800
Algler	63	420- 500

Uygun ortam koşullarında solucanlar çok hızlı ürerler. Yaşam süreleri dört yıl ve üzerindedir. Cinsel olgunluğa yaklaşık 8 hafta içinde ulaşır ve çiftleşme sıklığı haftada birdir. Uygun koşullar altında, 6 hafta içinde 8 solucan 1500 solucan yavrusu dünyaya getirebilir [17].

Solucanlar otobur beslenirler. Tarla, bahçe ve mutfak atıklarıyla besin alımını gerçekleştirirler. Metal, plastik, cam gibi inorganik maddeleri yiyemezler. Gübre üretiminde Kırmızı Kaliforniya solucanı türleri çokça kullanılır. SG, organik bitkisel atıkların ve büyükbaş hayvan dışkılarının, solucanlar tarafından kimyasal ve fiziksel yapılarını sindirim sistemlerinden geçirerek değiştirmesi olgusuna dayanarak üretilir [17].

Gübre üreten diğer türler: *Eisenia andrei* (red tiger worm), *Eisenia fetida* (tiger worm), *Perionyx excavatus* (Indian blue worm), *Fletcherodrilus spp*, *Eudrilus eugeniae* (African night crawler), *Dendrobaena veneta*, *Herteroporodrilus spp.*, *Pheretoma excavatus*'dur. *L. Rubellus* ve *P. Excavatus* sıcak iklim kuşağında yer alan bölgelerde yoğun olarak görülürken, *E. Fetida*, *D. Veneta* ve *E. Andrei*'nin ılıman iklime sahip bölgelere adapte olduğu bilinmektedir. Bu beş tür, gübre üretiminde en iyi sonucu veren türlerdir [18].

Solucanların yaşam alanında uygun ortam koşulları olarak nem ve sıcaklık sağlandıktan sonra gübreyi daha verimli hale getiren ve solucanların yaşamını devam ettiren kısım solucanların beslenmesidir. Yemeye sürekli eğimli olduklarından aç kalmamaları gerekmektedir. Acıktıklarında yaşam alanından kaçmaya çalışırlar ve bu durum onların ölümlerine neden olur [19].

Solucanlar için mama yapımında pişirilmiş ürünler, asitli ürünler, narenciye, sarımsak, soğan, süt, balık ve biber gibi ürünler kesinlikle verilmemelidir. Özellikle asitli ürünler ölmelerine neden olabilir. Bunların yerine yanık hayvan gübresi, yumurta kabuğu, kahve veya çay posası, lahana, elma, karpuz kabuğu veya muz kabuğu gibi ürünler verilebilir. Hızlı bir şekilde çoğaldıkları için mama miktarı da sürekli arttırılmalıdır. Verimli bir SG üretiminde solucanların yatağı sürekli olarak kontrol edilmeli ve mamaları takip edilerek bittiğinde üzerine vakit kaybetmeden eklenmelidir [19].

1.5.1. Solucan Gübresinin Özellikleri

Mikrobiyal ve besin açısından çok zengin olan SG sindirilmiş komposttan üretilir ve toprak katkısı olarak önemli bir maddedir. SG ve 15 cm kalınlığındaki iyi bir toprak katmanı karşılaştırıldığında kimyasal analiz sonucu SG 7 kat daha fazla kullanılabilir potasyum, 1,5 kat daha fazla kullanılabilir kalsiyum ve 5 kat daha fazla kullanılabilir azot içerdiği ortaya konulmuştur. Ayrıca diğer topraklarla karşılaştırıldığında besin ömrünün 6 kat daha uzun ve solucanın fosforu sindirim sisteminden geçirirken bitkinin kullanabileceği fosfor formuna dönüştürdüğü tespit edilmiştir. SG'nin toprağın su ve hava alımını daha da düzenleyerek tohum filizlenmesine ve kök gelişimine de olumlu etkileri olduğu ortaya çıkmıştır. Ortalama olarak SG 1,8% – 2,2% P, 1,0% – 1,5% K ve 1,5% – 2,2% N içerir. Organik karbon oranı ise 9,15 ile 17,98 arasında değişir ve kalsiyum (Ca), sodyum (Na), sülfür (S), çinko (Zn), demir (Fe) ve magnezyum (Mg) gibi mikro besinler içermektedirler [17].

SG yüksek miktarda humus içerir. Toprağın hava geçişine imkan sağlayan kanallar oluşturur ve su tutma kapasitesini arttırır. Suyun bu tür topraklara geçişini %50'den daha fazla arttırır. Ve sıkışmış olan toprağın yeniden biçimlenmesini sağlar. Yapılan çalışmalarda Amerika'daki bir çiftlikte 10.000 solucanın, üç çiftçinin bir sene boyunca

8 saatlik vardiya ile çalışarak arsaya uyguladıkları 10 tona yakın hayvan gübresine karşılık gelen gübre ürettiği gözlemlenmiştir [17].

SG kullanımının toprak tuzluluğunun (EC) yok edilmesi ve toprak kaynaklı hastalıkların baskılanması gibi önemli tarımsal faydaları da vardır. Yapılan çalışmalarda, toprakta SG kullanımı sonrasında yaklaşık olarak kök hastalığının kırmızı biberde 98%'den 26%'ya ve domateste ise 82%'den 18%'e düştüğü görülmüştür [17].

1.5.2. Solucan Gübresi Üretim Sistemleri

1.5.2.1.Mezar Sistemi

Solucanların yerde yığınlar halinde, haftalık olarak belirli miktarlarda beslenmesi esasına dayanmaktadır. Sadece belirli bir alan ve mamaya ihtiyaç duyulması sebebi ile maliyeti düşüren bir sistem olmasına karşılık, yoğun kış şartlarında ısıtma zorluğundan dolayı ölümler ve kaçmalar yaşanmaktadır. Ayrıca, bu üretim sistemi korunaksız olduğu için yerden alınabilecek zararlı mikroorganizmaların varlığı açısından da büyük risk oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra alanın büyüklüğünden dolayı kontrolün zorlaşması ile yılan, fare gibi etkenlere maruz kalma olasılığının yüksek olması gibi sebeplerle üretilen gübrenin kalitesinin düşmesi gibi bir risk de söz konusudur. Mezar sistemi ile üretim Şekil 1.3'te verilmiştir [19].



Şekil 1.3. Mezar Sistemi [20]

1.5.2.2.Sürekli Akış Sistemi (SAS)

Sürekli akış sistemi, belirli ölçülerdeki kasanın alt tabakasına yerleştirilen iki eleğin motor yardımı ile ileri geri hareket ettirilerek üretilen gübrenin sürekli ve mekanik olarak hasadının sağlanması esasına dayanır. Üretimin nasıl yapıldığı Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4. Sürekli Akış Sistemi [21]

Mezar sisteminde olduğu gibi haftalık mama verilmesi, sıcaklık ve nem kontrolü gibi şartlar aynı şekilde sağlanır. Avantajı; gübrenin sürekli olarak istenilen zamanda temin edilmesidir. Aynı zamanda eleme işlemi de gerçekleştirildiği için zamandan tasarruf edilmektedir. Fakat bu işlemin sürekli olarak yapılması solucanların titreşimden etkilenmesine yol açıp, strese girmelerine neden olacaktır. Ayrıca gübrenin kısa sürede hasat edilmesinden dolayı solucanların içinde gezinme sürelerini azaltacak, bu ise gübre kalitesinin düşmesine sebep olacaktır. İşletme kurulurken kuruluş maliyetinin yüksek olması bir dezavantaj olmasına karşılık tek seferde dayanıklı bir sistem kurulacağı için uzun vadede kuruluş masrafları açısından avantajlı konumdadır [19].

1.5.2.3.Kasa Sistemi

Özel boyutlarda hazırlanan kasaların içerisine belirli sayıdaki solucanların homojen bir şekilde yerleştirilmesi yoluyla gübre üretilmesi esasına dayanmaktadır. Haftada bir kez %60 yanmış ahır gübresi %40 evsel atık olarak hazırlanan mama solucanlara verilmektedir. Günlük olarak sıcaklık ve nem kontrolleri yapılarak solucanların ortam şartları kontrol altında tutulmaktadır. 1 haftada gübrenin hazır olmasına karşılık, kasanın içinde 3 ay boyunca her hafta mama verilmeye devam edilerek gübre elde edilmektedir. Gübre çok sık aralıklar ile toplanmadığından solucanların strese girmesi

engellenmekte, solucanların gübre içerisinde kalma süreleri arttırılarak sölom sıvısını salgılama miktarları, diğer bir ifade ile gübreye geçen sölom miktarı arttırılarak gübrenin kalitesinin yükselmesi sağlanmaktadır. Bu yöntemin dezavantajları; gübre hasadı sırasında işçiliğin fazla olması, hasadın uzun sürmesi, sipariş verilmesi durumunda birkaç güne ihtiyaç duyulması şeklinde sıralanabilir. Bazı dezavantajlarına karşılık, sistemler içerisinde en kaliteli gübreyi elde etme şekli olduğu söylenebilir. Kasa sistemi ile üretim Şekil 1.5’te verilmiştir [19].



Şekil 1.5. Kasa Sistemi [22]

1.6.Biyogaz Değerlendirmesi

Bitkisel ve hayvansal organik atıklar ya tarımda gübre olarak ya da yakılarak ısınma amaçlı kullanılmaktadır. Bu ve benzeri atıkların, ısı üretmek amacıyla yakılması daha yoğunluktadır. Özellikle hayvan atıklarının yakılarak kullanılması hem verim açısından hem de yanma işleminden sonra kalan külün değerlendirilememesinden dolayı pek avantajlı görülmemektedir. Bir büyükbaş hayvandan senede 3,6 ton gübre elde edildiği ve bunun biyogaz üretimi için hammadde olarak kullanıldığı düşünüldüğünde, senede 120 m³ biyogaz elde edilmesi ve yan ürün olarak da organik gübre oluşumu söz konusudur [3].

Biyogaz çevre dostu, ucuz bir enerji ve gübre kaynağı olup atıkların yeniden değerlendirilmesini sağlayan bir üretim metodudur. Günümüzde biyogaz çoğunlukla elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Biyogazın elektrik enerjisi üretiminde genel

olarak iki yol vardır. İlkinde tesisin ihtiyacı kadar elektrik enerjisi üretilir. Bu sistemde gazın biriktirilebileceği uygun büyüklükte deponun var olması gerekir. İkincisinde ise elde edilen bütün biyogaz elektrik enerjisi için kullanılmaktadır. Tesisin ihtiyacından fazla olan elektrik ise satılarak ekonomiye kazandırılır [4].

1.7.Biyogaz Üretiminin Yararları

Organik atıklar, genellikle yakılarak ısı olarak kullanılmakta ya da tarımda doğrudan gübre olarak kullanılmaktadır. Biyogaz üretiminde kullanılan atıklardan enerji elde edilebildiği gibi aynı atıklar biyogaz üretiminde kullanıldıktan sonra çıkan posa toprağa gübre olarak kazandırılmaktadır. Biyogazın faydaları şu şekilde sıralanabilir:

- Hem enerji hem de gübre olarak çevreye dost ve ucuzdur.
- En önemli etkilerinden biri de atıkların geri kazanılmasında önemli rol oynar.
- Hayvan gübresinin kokusu biyogaz üretiminden sonra yok denilecek kadar azdır.
- Atıkların zararlı etkilerinden dolayı insan sağlığını ve yeraltı sularını olumsuz etkileyecek hastalıkların oluşma riski büyük ölçüde azalır.
- Atıklardan çıkan gazların sera gazı etkisi olarak atmosfere yayılması ortadan kaldırılmış olur.

Biyogaz üretimi ile üretilen elektrik ve ısı kullanımı ile beraber fosil kaynaklı enerji kullanımı ihtiyacı azalır. Atıkların biyogaz üretiminde kullanılmasıyla beraber atıklardan dolayı bölgedeki oluşabilecek kötü görüntü ve kokunun önüne geçilmiş olur. Biyogaz üretimiyle ayrıca istihdam da sağlanmış olur.

Tüm bu faydaların yanısıra biyogaz üretiminin bazı olumsuz yönleri ise şu şekildedir:

- Yanıcı ve parlayıcı olan biyogazın üretimi için hazırlanan sistemin çok dikkatli hazırlanması ve bakımlarının düzenli olarak yapılması gerekir.
- Kullanılan atık türüne göre su tüketimi fazla olabilir.
- Biyogaz tesislerinin yapımı için gerekli yatırım maliyetleri yüksek olabilir.
- Kullanılan atık türüne göre verimi düşük olabilir.

1.8.Biyogaz Kullanım Alanları

1.8.1. Biyogazın ısıtma amacıyla kullanılması

Biyogaza yanıcı özelliğini veren şey içeriğinde bulunan metan gazıdır. Biyogazın, tam yanma gerçekleştirebilmesi için yaklaşık olarak 1/7 oranında hava ile karıştırılması gerekir. Ocaklardan ve gaz yakıtlarla çalışan fırınlardan ısıtma amacıyla yararlanılabilir. Ayrıca şofben ve termosifon gibi su ısıtma cihazlarında da biyogaz kullanılabilir.

Biyogaz, LPG ile çalışan sobaların gözlerinde bulunan meme çaplarında basınç ayarı yapılarak kolaylıkla kullanılabilir. Soba ile ısıtmada yakıt olarak biyogaz kullanımında, hidrojen sülfür gazının (H_2S) yakılmadan ortama yayılmasını önlemek amacıyla bir baca sisteminin yapılması gerekmektedir [23].

1.8.2. Biyogazın aydınlatma amacıyla kullanılması

Biyogaz, uygulamada, doğrudan yakılarak (LPG ile yanan lambalar) ve/veya elektrik enerjisine çevrilmek suretiyle aydınlatma cihazlarında kullanılabilir. Biyogazın LPG ile yanan lambalarda kullanılması durumunda aydınlatan alevi arttırmak için cam fanus ve amyant gömlek kullanılmaktadır. Işığı sabitleyen cam fanus aynı zamanda çıkan ısıyı geri verir ve bununla beraber alev daha fazla olur [23].

1.8.3. Biyogazın araç motorlarında kullanılması

Biyogaz, araç yakıtı olarak hem ağır vasıtalarda hem de binek araçlarda kullanılabilir. Biyogazın motorlu taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için içeriğindeki metanın %96,97'ye kadar yükseltilmesi ve H_2S 'in 17 ppm'in altında olması gerekir. 1 m³ biyogaz içeriğinde %97 oranında metan bulunursa, yaklaşık 1 litre benzinle eşdeğer enerjiye sahip olur. Bazı ülkelerin biyogaz standartları Tablo 1.5.'te verilmiştir [24].

Tablo 1.5. Bazı Ülkelerde Biyogazın Motorlu Taşıtlarda Kullanılabilmesi İçin Biyogazdan İstenen Özellikler [24]

	İsveç	Fransa	İsviçre
Çiğ Noktası Sıcaklığı (°C)	En düşük dış ortam sıcaklığından daha düşük		
Alt Isıl Değer (MJ/Nm³)	45,5	38-46	-
Metan (min) (% hacim)	97	97	96
Su İçeriği (max) (mg/Nm³)	32	100	5
Oksijen (max) (% hacim)	1	3,5	0,5
CO₂ (max) (% hacim)	3	2	-
H₂S (max) (ppm)	17	5	4
CO₂ + O₂ + N₂ (max) (% hacim)	3	3	3

Biyogaz, benzinle çalışan araçlarda katkı maddesine ihtiyaç duymadan doğrudan kullanılabilmesi gibi içerdiği metan gazı saflaştırılarak daha verimli şekilde de kullanılabilir. Dizel motor ile çalışan araçlarda kullanımında belirli oranda (%18,20) motorin ile karıştırılması gerekir [23].

Biyogaz, nitrojen oksit salımı düşük bir yakıt kaynağı olduğundan, birçok ülkede, otobüsler ve diğer araçlarda alternatif enerji kaynağı olarak kullanılır. Gürültü seviyesi bakımından biyogaz kullanan motorların, dizel yakıt kullanan motorların gürültü seviyesinden çok daha düşük olması, biyogazın dizel motora göre tercih edilmesindeki en önemli faktörlerden biridir. Ayrıca, dizel motorun egzoz gazının emisyon seviyesi, biyogaz egzoz gazının emisyon seviyesine göre daha yüksektir [4].

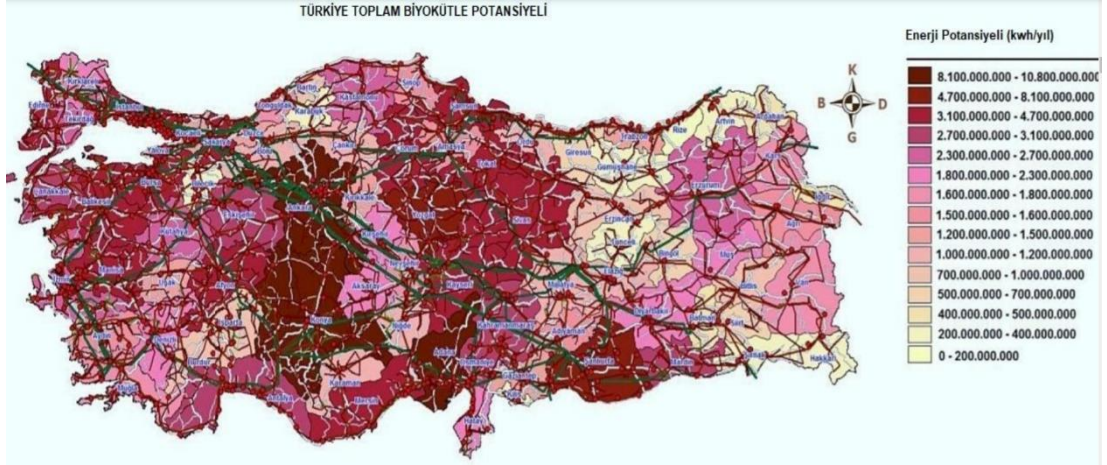
1.9.Türkiye’de Biyogaz

Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü ile beraber 1957 yılında Türkiye, biyogaz ile ilgili ilk çalışmalara başlamıştır. Bazı Devlet Üretme Çiftlikleri’nde 1960’lı yıllarda pilot tesisler kurularak biyogazla ilgili çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Yapılan çalışmalarla 1963 yılında, 5’i Eskişehir Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü’nde, 2’si Eskişehir’in köylerinde ve biri de Çorum deneme istasyonunda

toplam 8 adet biyogaz tesisi kurulmuştur. UNICEF'in teknik bilgi ve finans yönünden desteklediği, Devlet Planlama Teşkilatı tarafından yürütülen çalışmalar 1980 sonrasında başlatılmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Tarım ve Orman Bakanlığı gibi kurumlar yanında TOPRAKSU, Maden Teknik ve Araştırma Genel Müdürlüğü gibi kuruluşlar da bu çalışmalarda yer almışlardır. Doğudaki illerden başlayarak, kırsal kesimde biyogaz tesislerini yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. 35 m³'lük bir tesisin kurulmasıyla, Muş Alpaslan Devlet Üretim Çiftliği'nde ilk çalışmalar başlatılmıştır. Farklı iklim koşullarında, çeşitli Devlet Üretim Çiftlikleri'nde, pilot tesisler kurularak test edilmiştir. Konuyla ilgili sorumluluk 1982 yılında, TOPRAKSU işletimine verilmiş, devletin köylülere sağladığı 6, 8, 12 ve 50 m boyutlarında, 1000 adet biyogaz sistemleri kurulmasını sağlamıştır. Ankara ve Erzurum'da da 1984–1987 yılları arasında Köy Hizmetleri Eskişehir Araştırma Enstitüsü tarafından biyogazla ilgili araştırma projeleri yürütülmüştür. Ancak, yetişmiş personel eksikliği ve projeler arasında iletişim kopukluğundan dolayı iyi sonuçlar elde edilememiştir [25].

Biyokütle, biyogaz ve organik atıklardan enerji elde etme konusunda, Türkiye'de son zamanlarda kamu ve özel sektör yatırımları artmaya başlamıştır. Büyükşehir belediyeleri çöp atıklarının çözümü için atık yakma ve enerji üretim tesisleri kurmaya başlayarak bu alanda çalışmalar yapmışlardır. 2007'den itibaren Türkiye'de, asıl amacı kendi elektrik enerji ihtiyacını karşılamak olan, biyokütle ve atık yakıt kaynaklı, devletle birlikte çalışarak (otoprodüktör) gerçekleştirilen ve yapımı biten, güç üretim (kojenerasyon) ve bileşik ısı tesisleri kurulup hizmete alınmıştır. Tesislerin bazıları, 5,2 MW gücünde olan (37 GWh/yıl kapasiteli) Köseköy (İzmit) çöp gazı santrali, 4 MW gücünde olan (7 GWh/yıl kapasiteli) Kemerburgaz (İstanbul) çöp gazı santrali, 3,2 MW gücünde olan (22 GWh/yıl kapasiteli) Belka (Ankara) çöp gazı santrali ve 0,8 MW gücünde olan (6 GWh/yıl kapasiteli) Adana çöp gazı santralidir [26].

Türkiye, biyokütle enerjisi için gerekli malzeme üretimi açısından elverişli tarımsal alan kullanılabilirliği, güneş, iklim koşulları ve su kaynaklarına sahip olup bu enerji için fazla miktarda kaynak oluşturabilecek yapıya sahiptir. Türkiye'nin biyokütle enerjisi potansiyelinin dağılımı Şekil 1.6'da gösterilmiştir [27].



Şekil 1.6. Türkiye’de İllere Göre Biyokütle Potansiyel Dağılımı [6]

Türkiye’de biyokütle enerji potansiyelini araştırma alanında; Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’ne ait Türkiye Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası (BEPA) isimli bir uygulama bulunmaktadır. Bu uygulama, Türkiye’de nerede ve ne çeşit biyokütle kaynağı olduğunu, bu biyokütleden ne miktarda biyoyakıt ve bu biyoyakıtın elektrik üretme potansiyelinin ne kadar olduğunu, bu kaynakların ülkenin hangi yörelerinde yoğunlaştığını, sayısal ifadeler ile grafiksel bir şekilde dinamik olarak harita üzerinde gösterebilen Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) uygulaması olarak tanımlanabilir. BEPA ile güncel olarak atıkların toplam enerji miktarı ve atık miktarları gibi bilgiler de alınabilmektedir [27].

Türkiye’de biyokütleden enerji elde etme üzerine çok çeşitli araştırmalar yapılmış/yapılmaktadır. Bu araştırmalar, Türkiye’nin biyokütle üzerine sahip olduğu potansiyel hakkında çok değerli bilgi ve anlamlar içermektedir. Yapılan çalışmalar Türkiye’nin yarını için önemli enerji kaynak verilerini oluşturmaktadır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Ardıç, 2003 yılında yapmış olduğu çalışmasında tavuk gübresinde (TG) bulunan katı maddenin suda çözünürlüğü ile TG'nden biyogaz üretim veriminde termal, termokimyasal ve kimyasal önışlemlerin etkilerini araştırmıştır. Maksimum biyogaz ve metan üretimi verimi (134.22 mL biyogaz/g KM ve 78.17 mL CH₄/g KM), katı maddenin kütlege %15'i kadar NaOH ile oda sıcaklığında, 1 saatlik bazik kimyasal önışlemden elde edilmiştir [28].

Bor bileşenlerinin laboratuvar ölçekli biyogaz reaktörleri kullanılarak yapılan, hayvansal atıklardan biyogaz üretim çalışmalarına etkisi Aslanlı (2009) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada, 35 günlük total biyogaz verimi dikkate alındığında biyogaz üretim reaktörüne boraks eklenmesi sonucu metan oranındaki artışla, 1 kg sığır gübresinden 606,4 mL biyogaza eşdeğer daha fazla üretimin gerçekleşmiş olduğu tespit edilmiştir [3].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yapılan çalışmada, biyogaz üretiminin ve kullanımının dünya çapında yaygın bir şekilde arttığı, Almanya'da 5500'ün üzerinde tarımsal alanda kurulan ve işletilen biyogaz tesisinin mevcut olduğu ve buna bağlı olarak kullanılan teknolojilerin de geliştirildiği belirtilmiştir. Bu gelişen teknoloji ve artan bilgi birikime rağmen Almanya'da daha yeni teknoloji ve bilgilere duyulan ilginin oldukça fazla olduğu, tarımsal biyogaz kullanımı ve üretimi için yapılan çalışmalarda hukuksal, ekonomik, organizasyonel ve teknik sorulara uygulama odaklı ve ayrıntılı cevaplar alınması amacıyla bu çalışma yapıldığı belirtilmiştir [13].

Buğutekin (2007) tarafından atıklardan biyogaz üretiminde, biyogaz üretim verimini etkileyen faktörlerden karıştırmanın etkisi incelenmiştir. Çalışmada karıştırma ve atık içerisindeki sıcaklığın homojen dağılım gösterdiği, karıştırmanın biyogaz verimim %30 civarında etkilediği tespit edilmiştir [4].

Dayar, 2019 yılında SG için ekonomik analiz araştırması yapmıştır. Araştırmacı SG üreten 15 firmaya ve bitkisel üretim yapan 98 tarım işletmesine anket yapıldığı, bir işletmenin 1.000.000 solucanla faaliyet göstermesi durumundaki işletme masrafları, yatırım masrafları ve işletmenin geliri hesaplanarak yapılan yatırımın mali analizi araştırılmıştır [19].

Eyidoğan, 2008 yılındaki makalesinde motorlu taşıtlarda organik atıkların işlenmesi ile elde edilen biyogazın yakıt olarak kullanılabilmesi için saflaştırılması ve saflaştırılma yöntemlerini ele almıştır. Biyogazın %50-70 metan (CH_4), %30-50 CO_2 ve 10-4000 ppm hidrojen sülfür (H_2S) içerdiği, motorlu taşıtlarda biyogaz kullanılabilmesi için metan içeriğinin %96-97 oranında ve H_2S miktarının ise en fazla 17 ppm civarında olması gerektiği belirtilmiştir. İstenilen metan oranı ve H_2S miktarını içeren biyogazın, yüksek basınç altında (200-250 bar) sıkıştırılabileceği ve sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) veya biyogaza uyumlu araçlarda yakıt olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [24].

Ülkemizde hayvan gübresinden elde edilebilecek biyogaz miktarını ve bunun haritaya dökülmesi üzerine Görmüş (2018) tarafından yapılan çalışmada, kümes hayvanları, büyükbaş ve küçükbaş hayvanlarından üretilebilecek biyogaz miktarları TÜİK verilerinden elde edilen bilgilere göre hesaplanmaya çalışılmıştır. Kümes hayvanı, küçükbaş ve büyükbaş olmak üzere Türkiye'deki toplam hayvan sayısının 389.092.722 adet olduğu, bu hayvanlarından elde edilen atık miktarının 627.373.383,16 kg/gün olarak hesaplandığı ve bu atıklardan üretilebilecek metan miktarının ise 3.616.980.957,52 $\text{m}^3/\text{yıl}$ olarak belirlendiği belirtilmiştir. Çalışmada, elde edilen bu metanın enerji değeri karşılığı 3.109.446,19 TEP/yıl ve 130.211,32 TJ/yıl olarak tespit edilmiştir [15].

Güç, 2010 yılında yaptığı çalışmada Uşak ilinde büyükbaş hayvan sayısını ve biyogaz potansiyelini belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada atık miktarı 820,155 m^3 ve buna karşılık gelen biyogaz 27 milyon $\text{m}^3/\text{yıl}$ ile toplam 67 milyon kWh elektrik enerjisi elde edilebileceği bulunmuştur [25].

Literatürde yer alan bir diğer araştırmada, İlkılıç ve Deviren (2011) biyogazın oluşumu ve saflaştırma yöntemleri üzerinde çalışmışlardır. Biyogazın taşınması, kullanımı ve depolanmasındaki problemlerin ana nedenlerinden olan CO₂, H₂S ve H₂O'nun ayrıştırılması için çeşitli yöntemler kullanılarak çalışma yapmışlardır ve çalışma neticesinde metan içeriği %97 olan biyogaz elde etmişlerdir [7].

Türkiye biyokütle enerjisi potansiyeli İllez'in 2020 yılında yaptığı çalışmada değerlendirilmiştir. Birincil enerji kaynakları olarak biyokütle 1990 yılında %10,3 paya sahip iken 2018 yılına gelindiğinde bu oran %10,5 olmuştur. 2018 yılında Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle enerjisinin payı %15,5 iken dünya genelinde ise bu oranın %70'e yakın olduğu tespit edilmiştir [27].

Kocaeli Valiliği'nin hazırlamış olduğu bilgi notunda SG, SG'nin özellikleri, SG üretiminde kullanılan sistemler, üretim süreci ve tahmini SG tesisi kurulum maliyetleri ele alınmıştır. Çalışmada, SG'nin içerik bakımından toprağın elementlerini ve pH değerini dengelemede yardımcı olduğunu, toprakta verim artışı sağladığını ayrıca fosfor, potasyum, kalsiyum gibi organik dokusu sayesinde toprağın çözülmesini kolaylaştırarak bitki köküne erişimini kolay hale getirdiği belirtilmiştir [17].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogazın Türkiye'de hangi farklı amaçlarla kullanılabilirliği, Türkiye'nin bu enerji kaynağı için potansiyeli, tesis kurulum maliyeti ve diğer enerji kaynaklarına göre ekonomikliliği Öztuncay (2009) tarafından yapılan bir çalışmada araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde, bir ailenin yıllık pişirme ve aydınlatma yakıt ihtiyacını karşılayabilmek için ihtiyaç duyulan enerjinin, 5-6 adet büyükbaş hayvanın bir senede üreteceği gübreden yaklaşık 2600m³ biyogaz elde edilmesi ile karşılanabileceğini göstermiştir [23].

Sabuncu, (2010) yılında yaptığı araştırmada, atıklardan biyogaz eldesinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydalarını göstermiş ve bir enerji kaynağı olarak biyogazın önemini vurgulamıştır. Tesise kabul edilen çimen, hal-market, mezbaha, büyükbaş hayvan gübresi ve TG atıklarından 2.823 m³/gün'lük biyogaz eldesi

hesaplanmıştır. Atıkların biyogaz tesisinde kullanılması halinde toplam 3.672 tCO₂/yıl sera gazında azalma olacağı ve biyogaz üretimi ile en önemli çevresel sorunlardan küresel ısınmaya neden olan sera gazı salımlarında azalma sağlamanın mümkün olduğu vurgulanmıştır [5].

Seadi vd. 2008 yılında yaptıkları çalışmada neticesinde bir el kitabı hazırlamışlar ve kılavuz kitapta biyogaz üretim teknolojileri ile ilgili ilgili temel bilgileri, biyogazın kullanım alanlarına ve biyogaz üretim tesisi inşası için teknik bilgilere yer vermişlerdir. Çalışmada ayrıca biyogazın ekonomik değerini incelemişlerdir [6].

Tunçel, 2017 yılında yaptığı çalışmada gerçekçi bir biyogaz üretim santrali modellemesi yaparak uygun işletme koşullarını belirlemeye çalışmıştır. Bu modelleme için tavuk ve iki farklı organik içeriğe sahip büyükbaş atığının biyogaz üretim modellemesini yapmıştır. Elde edilen sonuçlarda, TG'nden her koşulda diğer atıklardan daha fazla biyogaz üretimi elde edildiği tayin edilmiştir. Uygulanan modelin literatürde yer alan çalışmalar ile uyum sağladığı tespit edilmiştir [8].

Yıldız vd. 2009 yılında organik atıklardan anaerobik ortamda biyogaz üretimi (biyometanizasyon) projesi incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Kaynağında ayrı toplanan organik atıkların (organik içerikli endüstriyel atıklar, sebze/meyve atıkları vb.) biyometanizasyon tesisinde biyogaz ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılabileceği; 45.000 ton/yıl kapasiteli bir tesiste, yıllık 5.400.000 m³ biyogaz yakılarak yıllık 8.456 MWh elektrik enerjisi üretiminin sağlanabileceği değerlendirilmiştir [26].

Chen vd. tarafından 2010 yılında yürütülen çalışmada mısır sapından metan elde edilmesi çalışmaları mısır sapının tek başına ve SG ilaveli olarak kullanıldığı sistemlerde incelenmiştir. Deneyler, 35 ± 1 °C sıcaklıkta, tekli mısır sapı içeren sistemde %1,2-%6,0 toplam katı madde oranlarında, ikili sistemde ise SG oranlarının %20-%80 arasında değiştiği ve %6,0 başlangıç toplam katı madde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Tekli sistemde metan verimi 217.60 ± 13.87 mL/g olarak, ikili

sistemde ise maksimum metan verimi %40 SG içeren sistem için 259.35 ± 13.85 mL/g olarak bulunmuştur [29].

Deepanraj vd. tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, anaerobik ortamda gıda atıkları ve kanatlı gübresinden farklı ön işlem uygulamaları (otoklav, mikrodalga ve ultrasonik) ile biyogaz elde edilmesi araştırılmış ve günlük biyogaz üretimi, kümülatif biyogaz üretimi, metan ve karbondioksit bileşimi belirlenmiştir. En yüksek kümülatif biyogaz üretimi 9926 mL olarak bulunmuştur [30].

Braeutigam vd. tarafından 2014 yılında yapılan bir araştırma, TG'nden biyogaz üretim çalışmaları yapılmış ve biyogaz üretimine ön işlem uygulamasının (ses ötesi dalgalar) etkileri araştırılmıştır. Çalışmada biyogaz veriminin ön işlem uygulaması ile %41'e kadar artırıldığı, metan içeriği %70,4'e olarak tespit edilmiştir [31].

Elissen ve Weide tarafından 2019 yılında böcek pisliği, SG ve saman, tavuk ve at gübresi karışımından metan üretim çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada, en yüksek biyogaz/metan verimi böcek pisliği için bulunurken, SG'nden biyogaz üretiminin en az olduğu belirlenmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriği, böcek pisliği için %58 iken SG için %38 olarak ölçülmüştür [32].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Mikrobiyal ve besin açısından oldukça zengin olan SG'nin tarımsal alanda kullanımı son zamanlarda önem kazanmıştır. SG'nin toprağın ve tarım ürününün verimliliğini arttırdığı bilinmekle birlikte tavuk gübresi, sığır gübresi vb. diğer hayvansal atıklar gibi biyogaz elde edilmesinde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar ise yok denecek kadar azdır. Bu tez çalışmasında temel amaç, kırmızı Kaliforniya solucanından elde edilen gübrenin (SG) biyogaz üretim potansiyelinin, tavuk gübresi (TG) ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve SG'nin biyogaz üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Çalışmalar, sabit karıştırma hızında ve sabit sıcaklıkta, kesikli karıştırmalı reaktörlerde yürütülmüş olup, üretilen biyogaz miktarı, taksimatlı kaplarda suyun yer değiştirmesi metoduyla hacimsel olarak tayin edilmiştir.

3.1. Deneyde Kullanılan Organik Maddeler

Tez çalışmasında organik madde olarak SG (Şekil 3.1.) ve TG kullanılmış ve SG ve TG'nin biyogaz üretim verimleri belirlenmeye çalışılmıştır. SG, Giresun ilinin Dereli ilçesine bağlı Kuşluhan mahallesinden temin TG ise Giresun ilinin Keşap ilçesinden temin edilmiştir. Bu çalışmada sabit karıştırma hızında ve sabit sıcaklıkta ısıtılan, kesikli karıştırmalı reaktörler kullanılarak SG ve TG'nin tekli ve karışım halinde biyogaz üretim miktarlarındaki değişimler gözlemlenmiş ve SG'nin biyogaz üretiminde kullanılabilirliği TG ile karşılaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 3.1. Deneylerde Kullanılan Solucan Gübresi

3.2. Yapılan Analizler

3.2.1. Toplam Katı Madde (TKM) Tayini

Toplam katı madde (TKM), numunenin 103-105 °C etüvde en az 1 saat kurutulması ile elde edilen maddenin mg/L cinsinden ifadesidir. Çalışmada organik madde olarak kullanılan SG ve TG için TKM miktarlarını belirlemek amacıyla, her biri hassas terazide belirli miktarda tartılan gübre numuneleri, krozeler içerisine alınarak etüvde nem kalmayacak şekilde kurutulmuş ve her bir gübre numunesi için TKM miktarları denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır [33].

$$TKM \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A-B) \cdot 1000}{mL \text{ numune}} \quad (3.1)$$

Bu denklemde,

TKM : Toplam katı madde (mg/L)

A : Kroze + numunenin ağırlığı (Etüv öncesi) (mg)

B : Kroze + numunenin ağırlığı (Etüv sonrası) (mg)'dir.

Deneylerde kullanılan SG ve TG'nin TKM içerikleri sırasıyla %45 ve %88 olarak tespit edilmiştir.

3.2.2. Toplam Uçucu Katı Madde (UKM) Tayini

Uçucu katı madde (UKM), TKM miktarı bulunan numunenin 550±50 °C kül fırınında 15-20 dakika yakılması sonucu elde edilen ürünün mg/L cinsinden ifadesidir. TKM miktarı belirlenen SG ve TG krozelerle, belirtilen sürede kül fırınında yakılması sonucu soğumaya bırakılmıştır ve soğuyan krozeler tartıldıktan sonra denklem 3.2'deki hesaplamalar yapılarak UKM miktarı belirlenmiştir [33].

$$UKM \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(C-D)*1000}{mL \text{ numune}} \quad (3.2)$$

Bu denklemde,

UKM : Toplam uçucu katı madde (mg/L)

C : Kroze + içindeki madde ağırlığı (kül fırınında yakmadan önce, mg)

D : Kroze + içindeki madde ağırlığı (550 °C'de yakıldıktan sonra, mg)'dır.

Deneylerde kullanılan SG ve TG'nin UKM içerikleri sırasıyla %55 ve %12 olarak tespit edilmiştir.

3.2.3. Toplam İnorganik Madde (TİM) Tayini

Toplam inorganik madde (TİM) (kül içeriği) kül fırınında yakılan numune kalıntısının boş krozeden farkının alınması sonucu elde edilen değerin mg/L cinsinden ifadesidir. Bu değer denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır [33].

$$TİM \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(E-F)*1000}{mL \text{ numune}} \quad (3.3)$$

Bu denklemde,

TİM : Toplam inorganik madde (kül içeriği) (mg/L)

E : Kroze + içindeki numune ağırlığı (550 °C'de yakıldıktan sonra, mg),

F : Kroze ağırlığı (mg)'dır.

Deneylerde kullanılan SG ve TG'nin TİM içerikleri sırasıyla %77 ve %37 olarak ve toplam organik madde (TOM) içerikleri ise sırasıyla %23 ve %63 olarak hesaplanmıştır.

3.2.4. pH ve Sıcaklık Ölçümleri

Çalışmada sistemin pH ve sıcaklıkları, reaktörün içine problemleri yerleştirilen Hanna marka pH metre ve sıcaklık ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Bu sayede sistemin pH ve sıcaklık düzeyi daima kontrol edilebilmiştir. Sistemde kullanılan cihaz Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deneylerde Kullanılan pH ve Sıcaklık Ölçme Cihazı

3.2.5. Biyogaz Üretim Sistemi

Tez çalışmasında, biyogaz üretimi için 500 mL çalışma hacmine sahip, 1 L'lik cam reaktörler tasarlanmıştır. Biyogaz üretimi için anaerobik ortam şartlarının sağlanması gerektiğinden, deneyde kullanılacak bütün ekipmanların sızdırmazlığı sağlanmıştır. Reaktör kapaklarından pH ve sıcaklık problemlerinin sızdırmaz bir şekilde montajı sağlanarak biyogaz üretimi boyunca sistemin pH ve sıcaklık değişimleri izlenmiştir. Deneyler, sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı üzerinde yapılmış olup, deney süresince homojenliği sağlamak amacıyla karıştırma hızı 300 rpm olacak şekilde

ayarlanmıştır. Biyogaz üretimi için kullanılan deney düzeneği şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Biyogaz üretim deneyleri, aynı koşullar altında tasarlanan iki reaktörde (şekil 3.3'te gösterilen 1 ile işaretlenen 1. reaktör pH ve sıcaklık kontrollü, 2 ile işaretlenen 2. reaktör pH ve sıcaklık kontrolü olmayan) paralel bir şekilde yürütölmüştür. Reaktörlerde üretilen kümülatif biyogaz miktarı, taksimatlı kapta suyun yer değiştirme yöntemi kullanılarak hacimsel olarak tayin edilmiştir [3,34].



şekil 3.3. Biyogaz Üretimi İçin Tasarlanan Deney Düzeneği

Ayrıca üretilen biyogazın içeriğindeki gaz türleri ve %miktarlarını belirlemek üzere IRCD4 Multi-Gas Detecting Alarm Manual Instruction marka gaz detektörü cihazı (şekil 3.4) kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Gaz Detektörü Cihazı

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

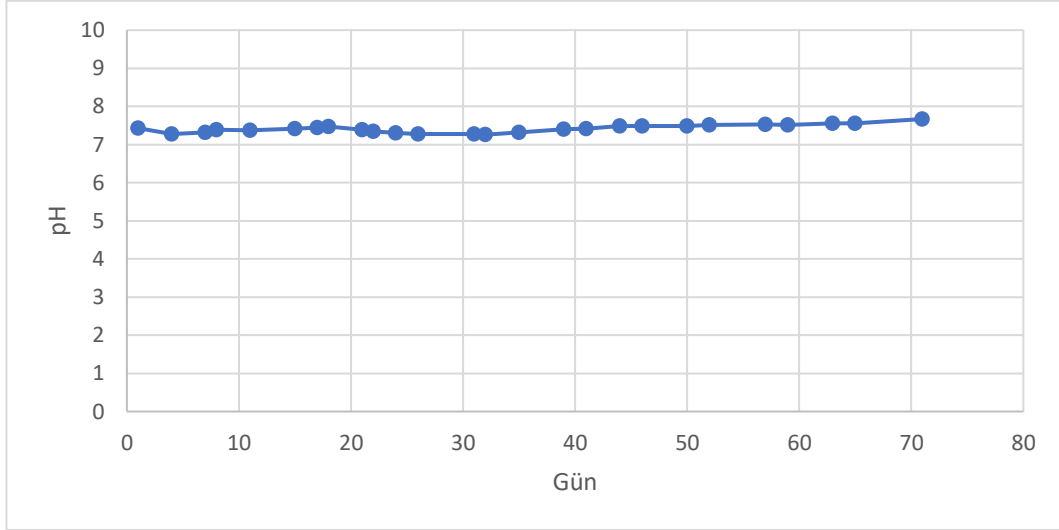
Bu tez çalışmasında, kırmızı Kaliforniya solucanından elde edilen gübrenin (SG) biyogaz üretiminde kullanılabilirliği araştırılmış ve elde edilen sonuçlar TG’nden elde edilen biyogaz üretim miktarı ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, SG ve TG’nin biyogaz üretim potansiyelleri ayrı ayrı ve karışım içerecek şekilde hazırlanan sistemlerde incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda SG için TKM miktarı %45, UKM miktarı %55, TİM miktarı %77 ve TOM miktarı %23 olarak hesaplanmıştır. TG için TKM miktarı %88, UKM miktarı %12, TİM miktarı %37 ve TOM miktarı %63 olarak hesaplanmıştır. Literatürde, en fazla biyogaz üretiminin kullanılan hammaddenin kütlege katı madde oranı %6 ile %10 arasında iken elde edildiği, kütlege katı madde oranının %12’den fazla olduğu durumlarda biyogaz üretimin azaldığı belirtilmiştir [7,28]. Bu nedenle tez çalışmasında, deney düzenekleri tüm sistemlerde %10 katı madde içeriği olacak şekilde planlanmıştır ve 500 mL suda 120,51 g SG ve 56,63 g TG kullanılmıştır. Deney süresince pH ve sıcaklık değerlerinin değişimi izlenmiş olup, elde edilen biyogaz miktarları incelenerek SG’nin biyogaz üretim potansiyeli belirlenmeye çalışılmıştır.

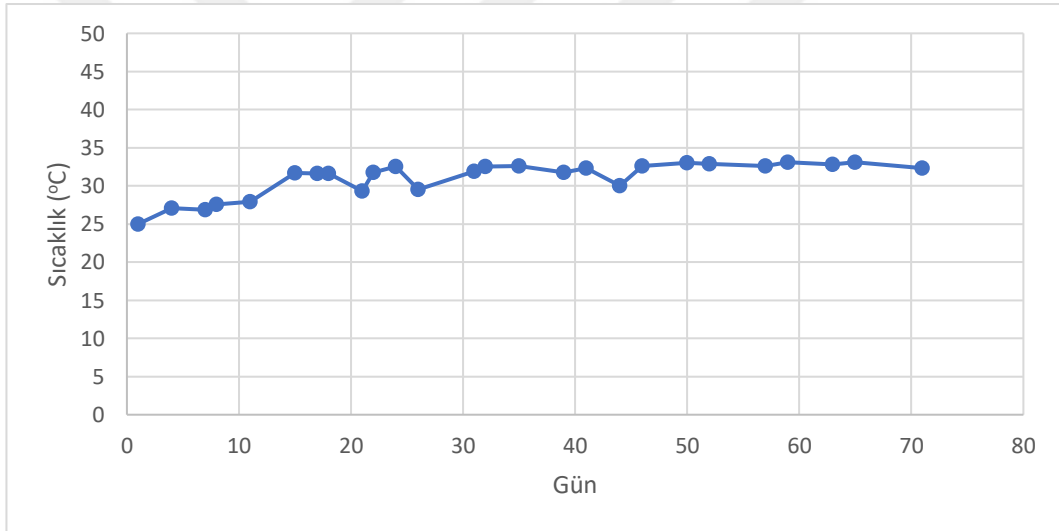
4.1. pH ve Sıcaklık Ölçümleri

4.1.1. Solucan Gübresi Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda ilk olarak sadece SG içeren deney düzeneği hazırlanmış ve deney sistemi paralel iki sistem (pH/sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz) olacak şekilde ayarlanmıştır. pH/sıcaklık kontrolünün olduğu deney düzeneğinde zamanla pH değişimlerini gösteren grafik Şekil 4.1’de ve sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği



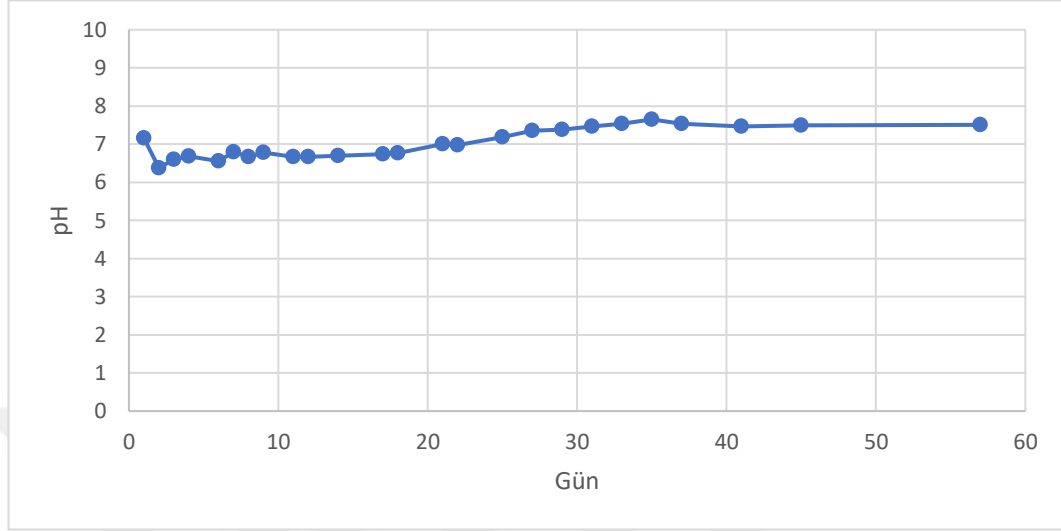
Şekil 4.2. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği

Şekil 4.1 ve 4.2’den görüldüğü üzere, SG’nden biyogaz üretim deneyi süresince pH ve sıcaklık değerlerinde önemli bir değişiklik yaşanmamıştır. Deney süresince pH değeri ortalama $7,42 \pm 0,25$ sıcaklık değeri ise 31 ± 6 °C olarak bulunmuştur.

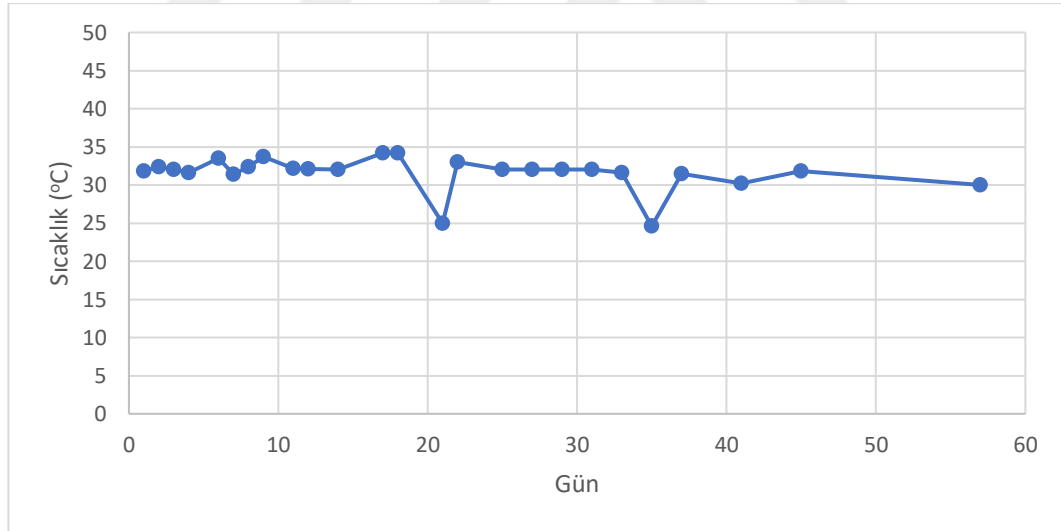
4.1.2. Tavuk Gübresi Çalışmaları

Deneyisel çalışmalarda ikinci olarak sadece TG içeren deney düzeneği hazırlanmış ve deney sistemi paralel iki sistem (pH/sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz) olacak şekilde ayarlanmıştır. pH/sıcaklık kontrolünün olduğu deney düzeneğinde zamanla pH

değişimlerini gösteren grafik Şekil 4.3’de ve sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği

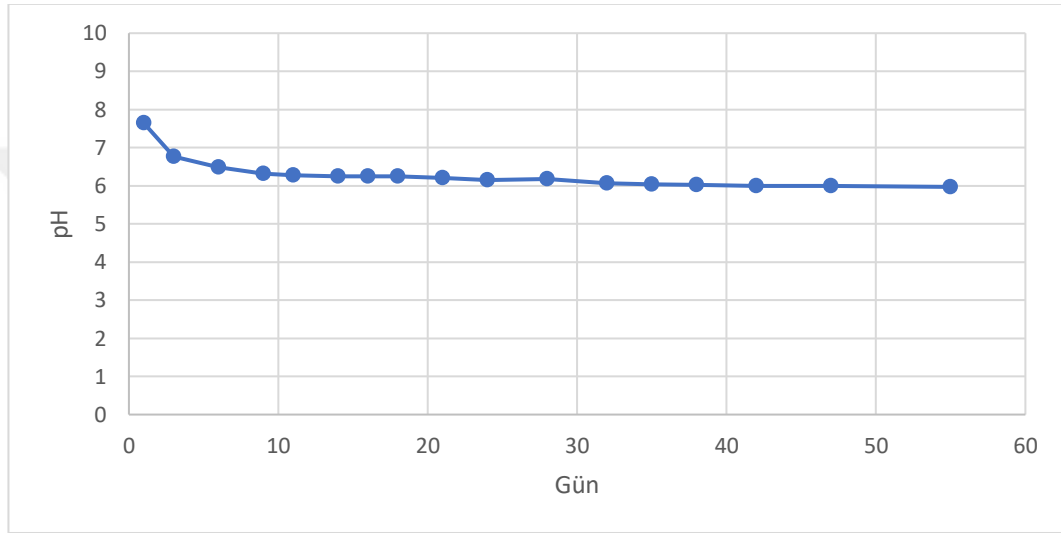


Şekil 4.4. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği

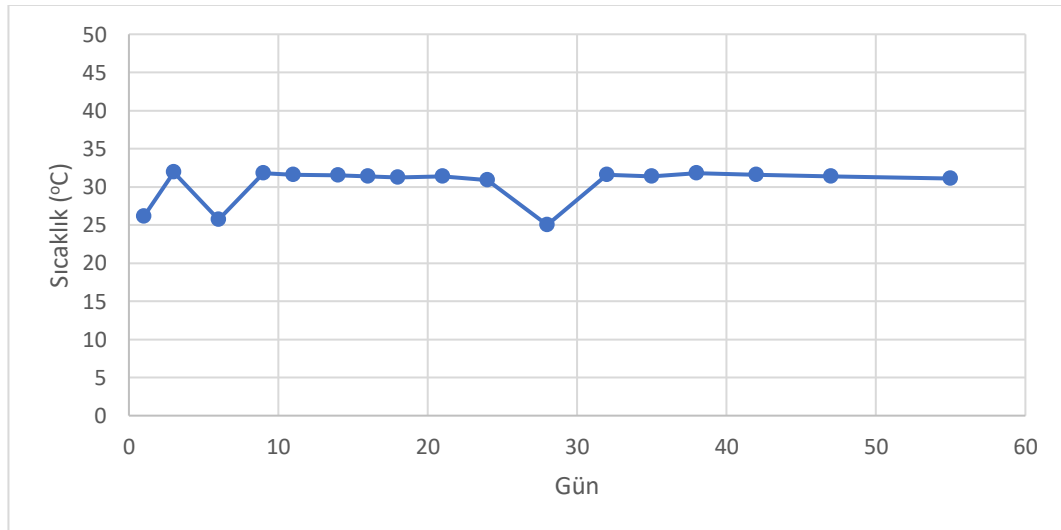
Şekil 4.3 ve 4.4’ten görüldüğü üzere, TG’nden biyogaz üretim deneyi süresince pH ve sıcaklık değerlerinde önemli bir değişiklik yaşanmamıştır. Deney süresince pH değeri ortalama $7,03 \pm 0,65$ sıcaklık değeri ise $31,57 \pm 6,97$ °C olarak bulunmuştur. Şekil 4.4’de 21. ve 35. günlerde sıcaklık değerinde yaşanan ani düşüşün sebebi ise elektrik kesintisi olmasından kaynaklanmıştır.

4.1.3. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda son olarak yarı yarıya SG ve TG içeren deney düzeneği hazırlanmış ve deney sistemi paralel iki sistem (pH/sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz) olacak şekilde ayarlanmıştır. pH/sıcaklık kontrolünün olduğu deney düzeneğinde zamanla pH değişimlerini gösteren grafik Şekil 4.5’de ve sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.5. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi pH Değişim Grafiği



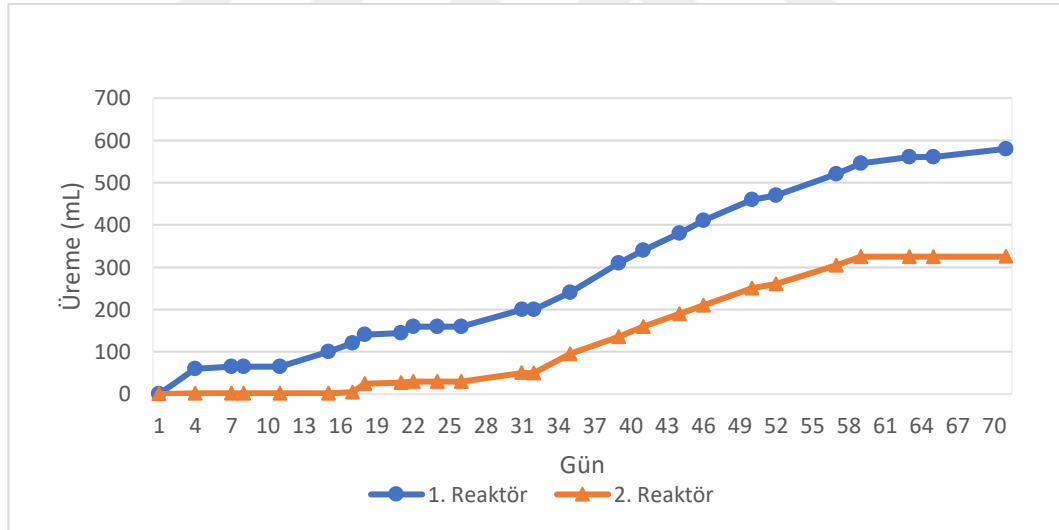
Şekil 4.6. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi Sıcaklık Değişim Grafiği

Şekil 4.5 ve 4.6'dan görüldüğü üzere, SG+TG'nden biyogaz üretim deneyi süresince pH ve sıcaklık değerlerinde önemli bir değişiklik yaşanmamıştır. Deney süresince pH değeri ortalama $6,28 \pm 1,36$ sıcaklık değeri ise $30,4 \pm 5,4$ °C olarak bulunmuştur. Şekil 4.6'da 6. ve 28. günlerde sıcaklık değerinde yaşanan ani düşüşün sebebi ise elektrik kesintisi olmasından kaynaklanmıştır.

4.2. Kümülatif Biyogaz Üretim Miktarları

4.2.1. Solucan Gübresi Çalışmaları

SG kullanılarak yapılan çalışmalarda, %10 katı madde olacak şekilde (500 mL hacimde 120,51 g SG) kullanılmıştır. Kümülatif biyogaz üreme miktarı, hacim deplasmanı metoduyla suyun dereceli kapta birikmesi ile oluşan biyogazın hacimsel verileri şeklinde elde edilmiştir. SG'nin kümülatif biyogaz üretim miktarının zamana karşı grafiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



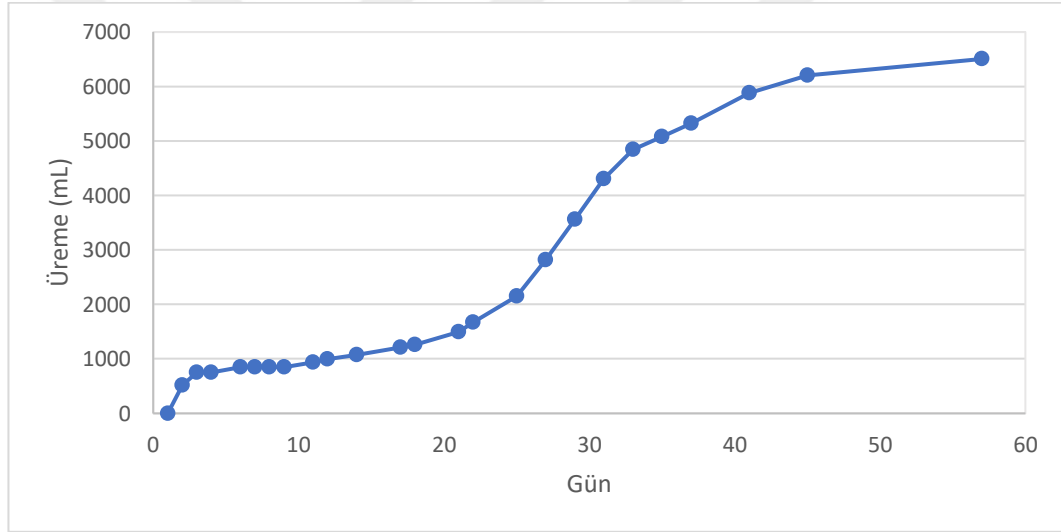
Şekil 4.7. Solucan Gübresi ile Biyogaz Üretimi

Deneyssel çalışmalar paralel iki sistem (pH/sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz) olacak şekilde hazırlanan düzeneklerde 70 gün boyunca incelenmiştir. 70 günün sonunda 1. reaktörde (pH/sıcaklık kontrollü) 580 mL, 2. reaktörde (pH/sıcaklık kontrolsüz) 325 mL biyogaz elde edilmiştir. 2. reaktörde biyogaz miktarının, 1. reaktöre göre az

olmasının nedeni, deney süresince 2. reaktörde meydana gelen gaz kaçağı sonucu olduğu tespit edilmiştir.

4.2.2. Tavuk Gübresi Çalışmaları

TG kullanılarak yapılan çalışmalarda %10 katı madde olacak şekilde (500 mL hacimde 56,63 g TG) kullanılmıştır. Kümülatif biyogaz üreme miktarı, hacim deplasmanı metoduyla suyun dereceli kapta birikmesi ile oluşan biyogazın hacimsel verileri şeklinde elde edilmiştir. TG'nin kümülatif biyogaz üretim miktarının zamana göre grafiği Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



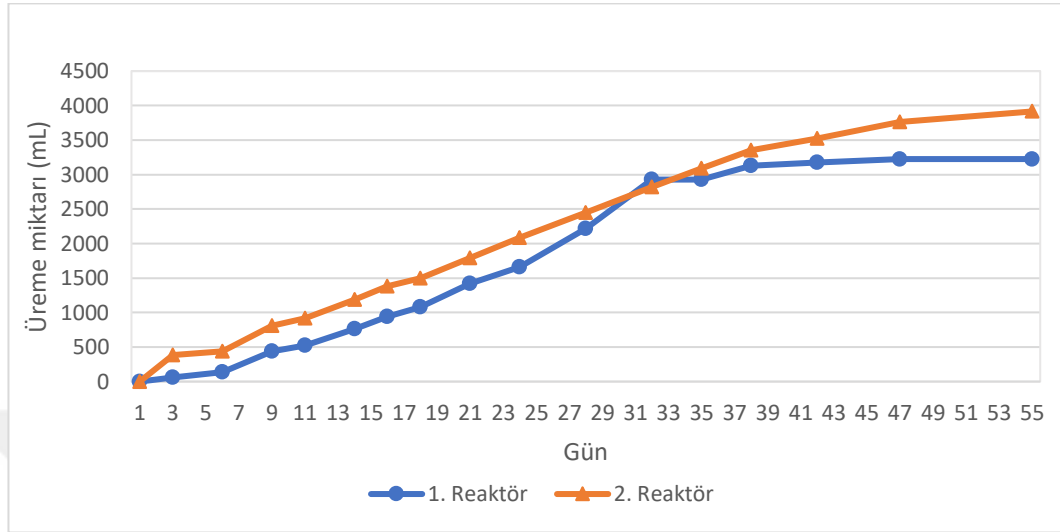
Şekil 4.8. Tavuk Gübresi ile Biyogaz Üretimi

Deneyisel çalışmalar tekli sistem (pH/sıcaklık kontrollü) olacak şekilde hazırlanan düzenekte 57 gün boyunca incelenmiştir. 57 günün sonunda 6505 mL biyogaz elde edilmiştir.

4.2.3. Solucan Gübresi + Tavuk Gübresi Çalışmaları

SG + TG kullanılarak yapılan çalışmalarda toplamda %10 katı madde olacak şekilde (500 mL hacimde 60,255 g SG ve 28,315 g TG) kullanılmıştır. Kümülatif biyogaz üreme miktarı, hacim deplasmanı metoduyla suyun dereceli kapta birikmesi ile oluşan

biyogazın hacimsel verileri şeklinde elde edilmiştir. SG ve TG karışımının kümülatif biyogaz üretim miktarının zamana göre grafiği Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımı ile Biyogaz Üretimi

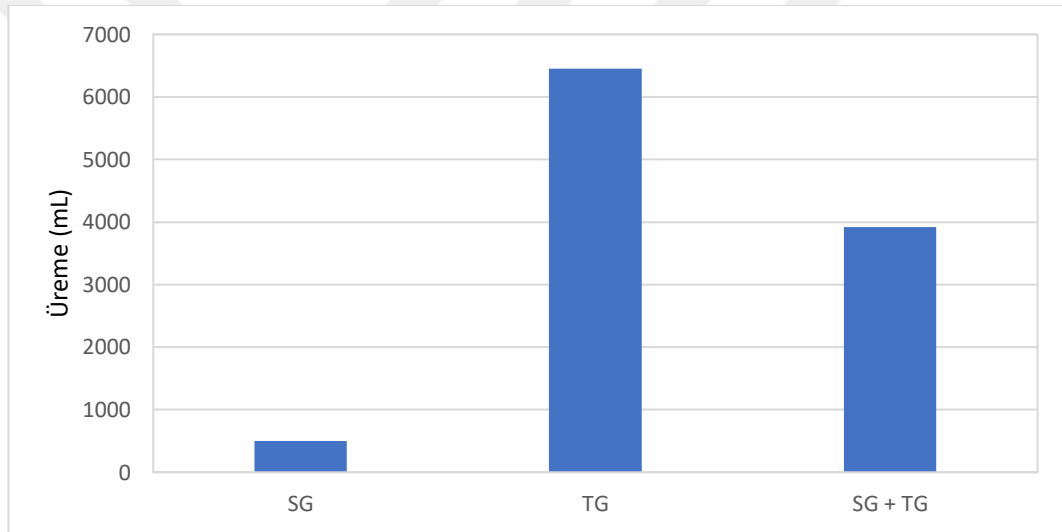
Deneysel çalışmalar paralel iki sistem (pH/sıcaklık kontrollü ve kontrolsüz) olacak şekilde hazırlanan düzeneklerde 55 gün boyunca incelenmiştir. 55 günün sonunda 1. reaktörde (pH/sıcaklık kontrollü) 3225 mL, 2. reaktörde (pH/sıcaklık kontrolsüz) 3915 mL biyogaz elde edilmiştir.

4.3. Biyogaz Üretimi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda biyogaz üretimleri SG için 70 gün, TG için 57 gün ve SG + TG karışımı için ise 55 gün boyunca izlenmiştir. Belirtilen süreler sonunda, biyogaz üretim miktarlarında önemli bir değişim olmadığı gözlenmiştir. Tüm sistemler için elde edilen kümülatif biyogaz miktarlarının karşılaştırılması aynı süre zarfında yapılmış ve biyogaz miktarları ilk 55 gün için Şekil 4.10’da karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.10’dan, 55 günün sonunda SG’nin biyogaz üretim potansiyelin olduğu ancak diğerlerine göre oldukça düşük bir değerde kaldığı (500 mL civarında) görülmektedir. En yüksek verim ise TG için elde edilmiştir. SG’den biyogaz üretiminin oldukça az olmasının iki sebebi olduğu düşünülmektedir. İlki, SG’nin mineral açıdan zengin

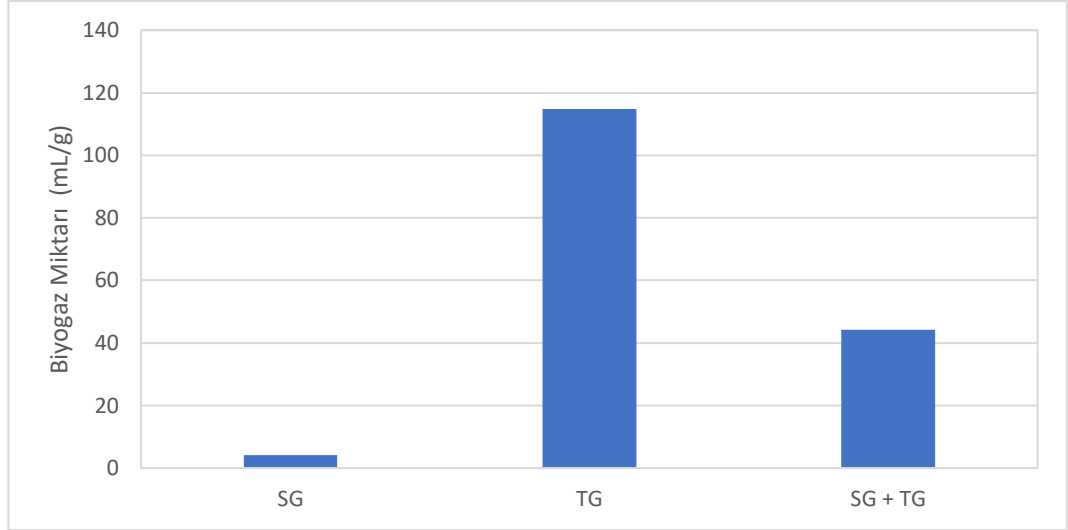
olmasına rağmen içeriğindeki organik madde miktarının TG'ne göre daha az olması olabilir. Deneysel çalışmalarda kullanılan SG'nin organik madde miktarı %23 iken bu değer tavuk gübresinde %63 civarında elde edilmiştir. Dolayısı ile TG'den elde edilen biyogaz miktarı SG'den daha fazla elde edilmiştir. Diğer bir neden ise aşı kullanılmaması olabilir. Tez kapsamındaki tüm deneysel çalışmalar; reaktörde ilk aşamada bulunan oksijenli ortamda oksijenin tükenerek biyogazın oluşumunu sağlayan mikroorganizmaların aktifleştirmesine yardımcı olacak aşılama işlemi yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bu durum ise SG'den biyogaz üretimini etkileyecek nedenlerden biri olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Kümülatif Biyogaz Üreme Miktarları

Daha gerçekçi bir yaklaşım ile, her bir sistemin belirli bir süre sonunda biyogaz verimleri ayrıca birim katı maddede oluşan biyogaz değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Buna göre, 55 günlük bir deney süresi sonunda elde edilen biyogaz miktarları birim katı madde için mL/g olarak hesaplanmış ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere, biyogaz verim sıralaması TG (114,87 mL/g) > SG+TG (44,2 mL/g) > SG (4,15 mL/g) şeklindedir.



Şekil 4.11. Birim Katı Madde İçin Oluşan Biyogaz Miktarları

4.4. Üretilen Biyogazın Nitelik Belirleme Çalışmaları

Çalışma kapsamında, SG ve TG kullanılarak tekli sistemlerde üretimi gerçekleştirilen biyogazların nitelik açısından içeriği gaz dedektörü kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir. Elde edilen verilere göre, TG’den elde edilen biyogazın metan içeriği %61, SG’den elde edilen biyogazın metan içeriği ise %22 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. Üretilen Biyogazların Bileşimi

Deney Düzeneği	CH ₄ Metan (%)	CO ₂ Karbondioksit (%)	H ₂ S Hidrojen sülfür (%)	O ₂ Oksijen (%)
1. Aşama (SG)	22	4	0	0
2. Aşama (TG)	61	7	0,00052	0

4.5. Matematiksel Modelleme Çalışmaları

Biyogaz üretim çalışmalarında, biyogaz üretim miktarları kullanılarak sistemin matematiksel modellemesini yapmak üzere iki farklı modifiye model (Logistic ve Gompertz) kullanılmıştır.

Biyogaz üretim hızı ile mikroorganizmaların çoğalma hızı doğru orantılıdır. Buna göre MATLAB R2021a programı kullanılarak büyüme eğrilerinden, büyüme eğrisi parametreleri hesaplanmıştır. Aralıklı zamanlarla ölçülen biyogaz üretim hızını programda yerine yazarak Logistic ve Gompertz modellerine uyarlanmış tahmin edilen verilere ulaşılmıştır. Birinci ve ikinci türevler kullanılarak mekanik modele dönüşüm sağlanmıştır ve biyolojik anlam ifade eden parametrelere ulaşılmıştır. Belirleme katsayıları (R^2) değerleri karşılaştırılmış ve en yüksek değere sahip model en uygun model olarak belirlenmiştir [35].

Tablo 4.2’de büyüme eğrilerini tahmin etmede kullanılan sigmoidal modeller ve denklemleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Büyüme eğrilerini tahmin etmede kullanılan Sigmoidal modeller ve denklemleri

MODELLER	DENKLEMLER
Logistic	$y = \frac{a}{1 + e^{(b-ct)}}$
Gompertz	$y = ae^{-e^{(b-ct)}}$

Modellerde kullanılan;

- y : t zamanındaki büyüklük,
- a : Asimptotik büyüklük
- c : Büyüme sabiti
- t : Zaman,
- b : Canlının başlangıç büyüme sabiti
- e : 2,71828

değerlerini ifade etmektedir.

Bu denklemlerin sigmoidal biyogaz üretim hızına göre modifiye edilmiş halleri Tablo 4.3.’te verilmiştir.

Tablo 4.3. Modifiye edilmiş Logistic ve Gompertz modelleri

MODELLER	DENKLEMLER
Logistic	$y = \frac{A}{1 + e^{\frac{4\mu_m(\lambda-t)}{A} + 2}}$
Gompertz	$y = Ae^{-e^{\left[\frac{\mu_m e(\lambda-t)}{A} + 1\right]}}$

Bu denklemlerde;

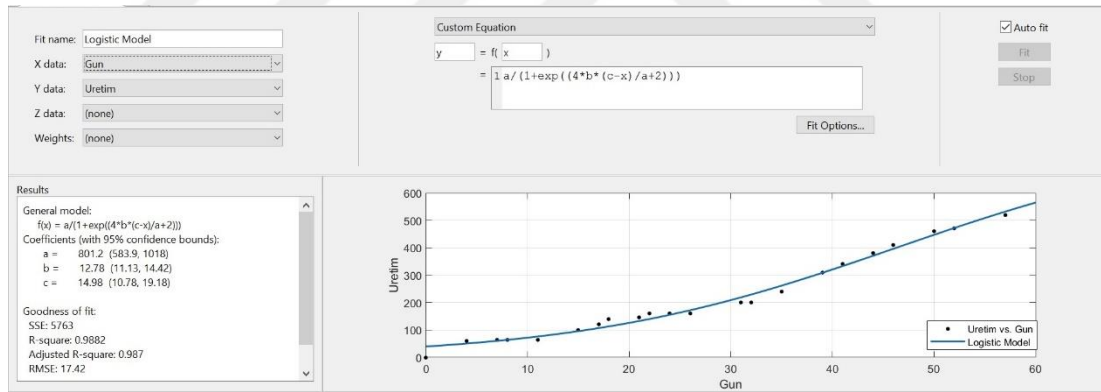
A : Maksimum biyogaz üretim miktarı (mL)

Λ : Gecikme süresi (gün)

μ_m : Spesifik biyogaz üretim hızı (mL/gün)

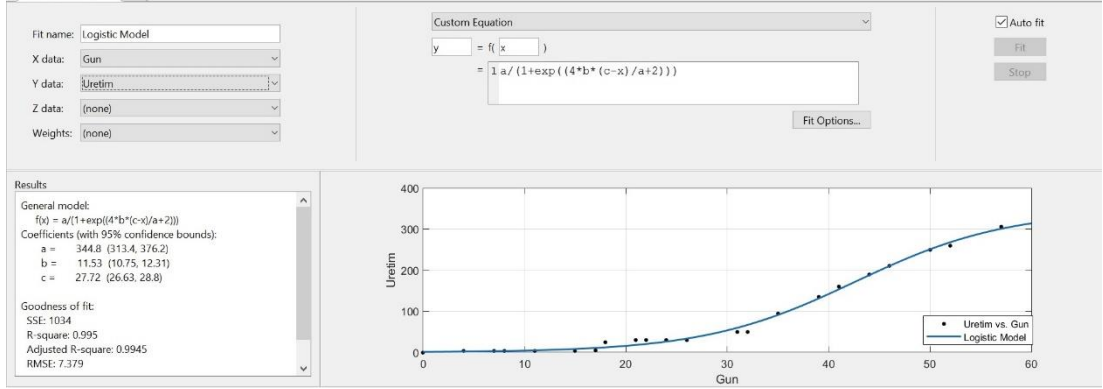
olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.12 (1. Reaktör) ve 4.13'te (2. Reaktör), SG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Logistic modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.12. Logistic Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör

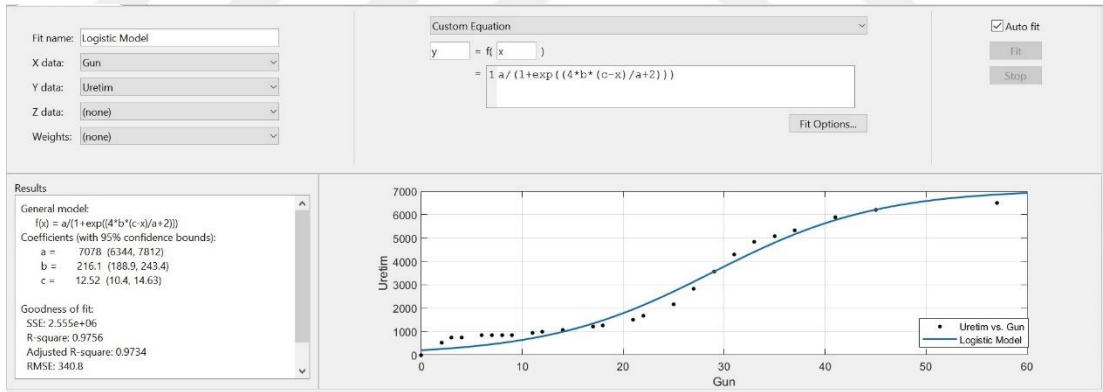
Şekil 4.12'ye bakıldığında SG ile 1. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 520 mL iken Logistic model ile SG'nden biyogaz üretimi miktarının 801,2 mL olacağı görülmektedir.



Şekil 4.13. Logistic Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör

Şekil 4.13'e bakıldığında SG ile 2. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 305 mL iken Logistic model ile SG'nden biyogaz üretimi miktarının 344,8 mL olacağı görülmektedir.

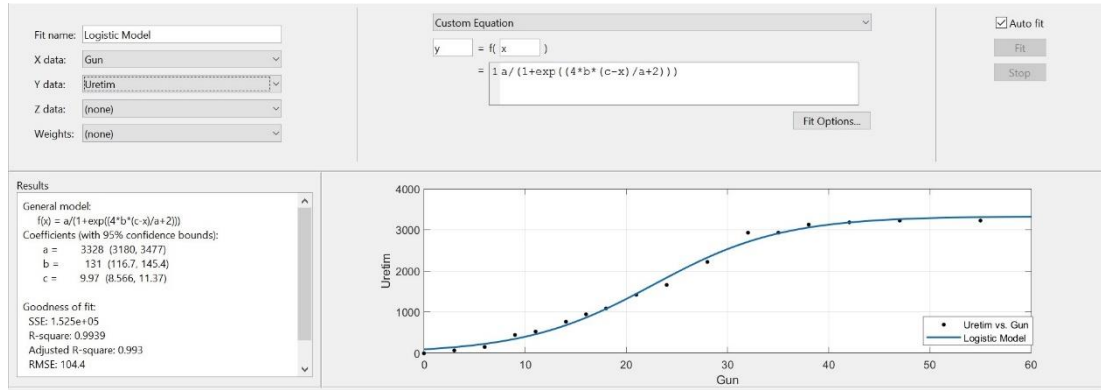
Şekil 4.14'te TG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Logistic modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.14. Logistic Model ile Tavuk Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi

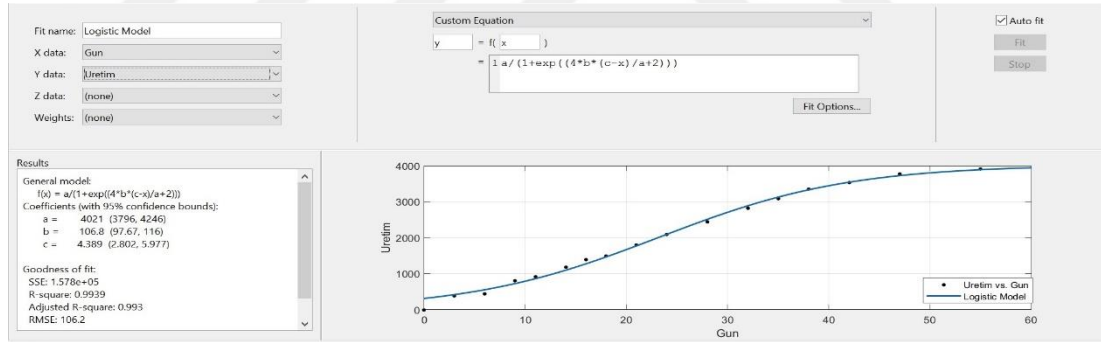
Şekil 4.14'e bakıldığında TG ile deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 6505mL iken Logistic model ile TG'nden biyogaz üretimi miktarının 7078 mL olacağı görülmektedir.

Şekil 4.15 (1. Reaktör) ve 4.16’da (2. Reaktör), SG+TG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Logistic modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.15. Logistic Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör

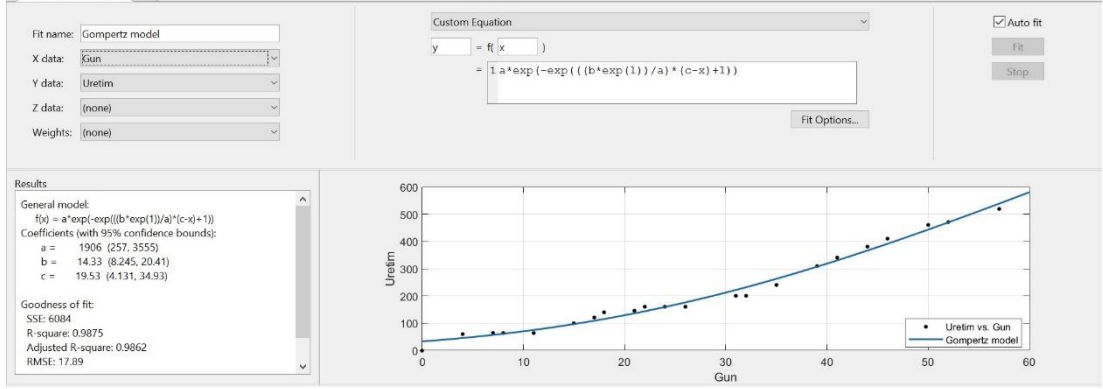
Şekil 4.15’e bakıldığında SG+TG ile 1. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 3225 mL iken Logistic model ile SG+TG’den biyogaz üretimi miktarının 3328 mL olacağı görülmektedir.



Şekil 4.16. Logistic Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör

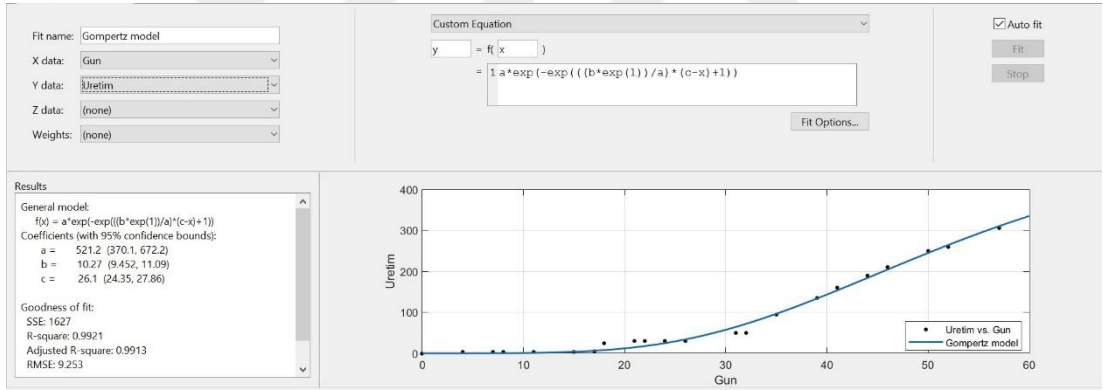
Şekil 4.16’ya bakıldığında SG+TG ile 2. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 3915 mL iken Logistic model ile SG+TG’den biyogaz üretimi miktarının 4021 mL olacağı görülmektedir.

Şekil 4.17 (1. Reaktör) ve 4.18’te (2. Reaktör), SG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Gompertz modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.17. Gompertz Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör

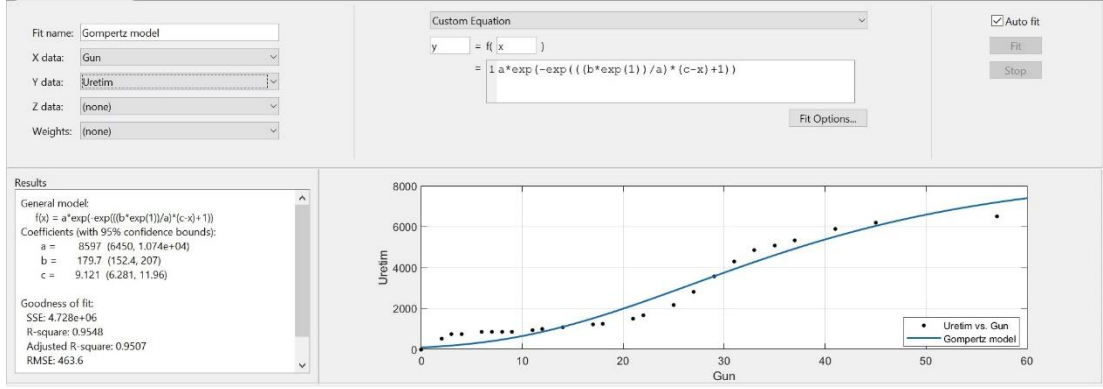
Şekil 4.17'ye bakıldığında SG ile 1. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 520 mL iken Gompertz model ile SG'nden biyogaz üretimi miktarının 1906 mL olacağı görülmektedir.



Şekil 4.18. Gompertz Model ile Solucan Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör

Şekil 4.18'e bakıldığında SG ile 2. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 305 mL iken Gompertz model ile SG'nden biyogaz üretimi miktarının 521,2 mL olacağı görülmektedir.

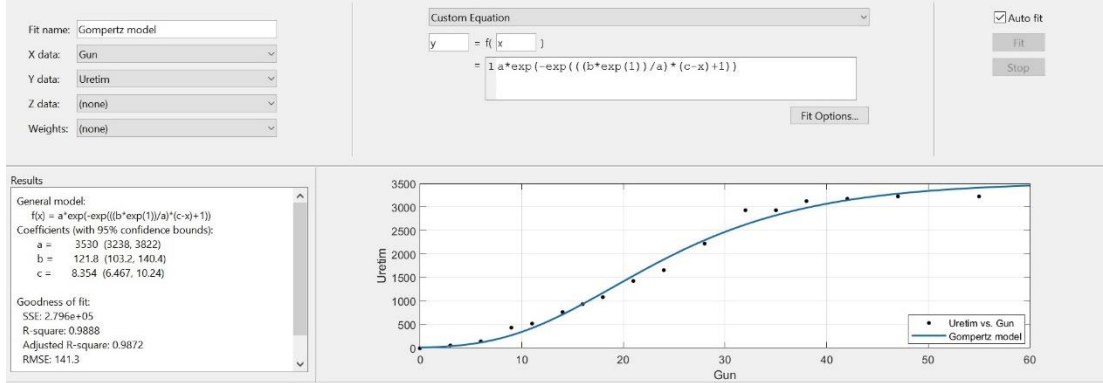
Şekil 4.19'da TG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Gompertz modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.19. Gompertz Model ile Tavuk Gübresinden Kümülatif Biyogaz Üretimi

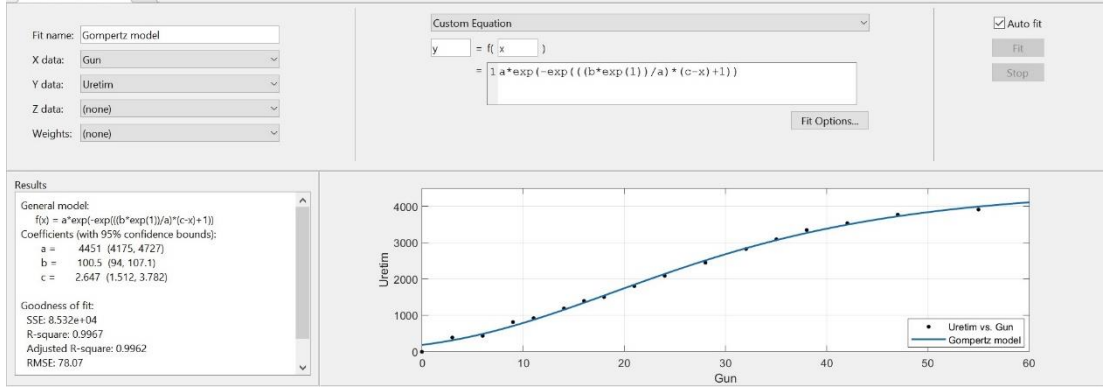
Şekil 4.19'a bakıldığında TG ile deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 6505mL iken Gompertz model ile TG'nden biyogaz üretimi miktarının 8597 mL olacağı görülmektedir.

Şekil 4.20 (1. Reaktör) ve 4.21'de (2. Reaktör), SG+TG kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanan Gompertz modelin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.20. Gompertz Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 1. Reaktör

Şekil 4.20'ye bakıldığında SG+TG ile 1. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 3225 mL iken Gompertz model ile SG+TG'den biyogaz üretimi miktarının 3530 mL olacağı görülmektedir.



Şekil 4.21. Gompertz Model ile Solucan Gübresi ve Tavuk Gübresi Karışımından Kümülatif Biyogaz Üretimi 2. Reaktör

Şekil 4.21'e bakıldığında SG+TG ile 2. Reaktörde deneysel olarak elde edilen biyogaz miktarı 3915 mL iken Gompertz model ile SG+TG'den biyogaz üretimi miktarının 4451 mL olacağı görülmektedir.

Logistic ve Gompertz model ile elde edilen veriler Tablo 4.4. ve Tablo 4.5.'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. Logistic modelleme yolu ile elde edilen veriler

Sistem	R ²	λ (gün)	μ _m (mL/gün)	A (mL)
SG (1. Reaktör)	0,988	14,98	12,78	801,2
SG (2. Reaktör)	0,995	27,72	11,53	344,8
TG	0,975	12,52	216,1	7078
SG+TG (1. Reaktör)	0,975	9,97	131	3328
SG+TG (2. Reaktör)	0,994	4,39	106,8	4021

Tablo 4.5. Gompertz modelleme yolu ile elde edilen veriler

Sistem	R ²	λ (gün)	μ _m (mL/gün)	A (mL)
SG (1. Reaktör)	0,987	19,53	14,33	1906
SG (2. Reaktör)	0,992	26,1	10,27	521,2
TG	0,955	9,12	179,7	8597
SG+TG (1. Reaktör)	0,989	8,35	121,8	3530
SG+TG (2. Reaktör)	0,997	2,65	100,5	4451

Tablo 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, R^2 değerleri Logistic model için 0,975 ile 0,995 arasında değişmektedir, Logistic model için en yüksek R^2 değeri 0,995 ile SG 2. reaktör için elde edilmiştir. Gompertz modeli R^2 değerleri 0,955 ile 0,997 arasındadır. Her iki model için de R^2 değerlerini karşılaştırdığımızda en yüksek R^2 değeri olan 0.997'ye (SG+TG reaktörüne ait) sahip Gompertz modelinin iyi uyum sağladığı söylenebilir.

Tablo 4.5 ve 4.6'dan en fazla biyogaz üretimi için A değerleri incelendiğinde, Logistic modelde A değerleri 344,8 mL ile 7078 mL arasındadır. Logistic modeli için en yüksek A değerine TG reaktörü sahiptir. Gompertz modelinde A değerleri 521,2 mL ile 8597 mL'dir. Gompertz modeli için en yüksek A değerine TG reaktörü sahiptir. Bu iki model A değeri için karşılaştırıldığında, en yüksek A değerini TG için 8597 mL olarak veren Gompertz modelinin olduğu görülmektedir.

Gecikme fazı (λ) için kinetik sabitler, bakterilerin substrata uyum sağlayabilmeleri için ihtiyaç duyduğu gecikme süresini gösterir. Tablo 4.5 ve 4.6 gecikme süreleri (λ) bakımından incelenecek olursa Logistic modelin gecikme süreleri 4,39 ile 27,72 arasında değişmektedir. En düşük değere SG+TG 2.reaktörü sahiptir. Gompertz modeli göre gecikme süreleri 2,65 ile 26,1 arasında değişmektedir ve en düşük değere SG+TG 2. reaktör sahiptir. İki model arasında kıyaslama yapıldığında, en düşük değere sahip olan modelin 2.65 ile Gompertz modeli olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.5 ve 4.6'daki veriler sonsuzdaki üretim hızı (μ_m) açısından değerlendirildiğinde, Logistic modelde bu değerler en düşük 11,53 mL/gün ile en yüksek 216,1 mL/gün arasındadır. Gompertz modelinde en düşük 10,27 mL/gün ile en yüksek 179,7 mL/gün arasındadır. En yüksek üretim hızına 216,1 mL/gün ile Logistic modelinin sahip olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, kırmızı Kaliforniya solucanından elde edilen gübrenin (SG) biyogaz üretim potansiyeli, tavuk gübresi (TG) ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Biyogaz üretim çalışmaları, anaerobik koşullarda, kesikli karıştırmalı reaktörlerde, sabit karıştırma hızında (300 rpm) ve sabit sıcaklıkta (35°C) gerçekleştirilmiştir.

Biyogaz üretim çalışmaları, laboratuvar ortamında tasarlanan 500 mL çalışma hacmine sahip 1 L'lik cam reaktörler içerisinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada sadece SG, ikinci aşamada sadece TG ve son aşamada ise SG+TG karışımının biyogaz üretim potansiyelleri incelenmiştir. Her sistemin biyogaz üretim potansiyeli suyun yer değiştirme testi ile hacimsel olarak belirlenmiştir. Üretilen biyogazların niteliği ise gaz detektörü kullanılarak belirlenmiştir. Deney süresince pH ve sıcaklık değişimi takip edilmiştir.

Deneysel çalışmalar süresince pH ve sıcaklık değişimleri takip edilmiş olup, değerlerde önemli bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. Her aşama için pH ve sıcaklık değişimleri Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Deney Düzeneklerinin pH ve Sıcaklık Değişimleri

Deney Düzenegi	pH	Sıcaklık (°C)
1. Aşama (SG)	7,42 ±0,25	31 ±6
2. Aşama (TG)	7,03 ±0,65	31,57 ±6,97
3. Aşama (SG+TG)	6,28 ±1,36	30,4 ±5,4

Yapılan çalışmalar neticesinde gübrelerin biyogaz üretim miktarları en yüksek miktardan en az miktara doğru TG (mL) > SG+TG (mL) > SG (mL) olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, SG'nin biyogaz üretim potansiyeli olmakla birlikte TG'ne göre verimin düşük olduğu görülmüştür.

Tablo 5.2. Deney Düzeneklerinin Biyogaz Üretim Verimleri

Deney Düzeneği	Maksimum Biyogaz Miktarı* (mL)
1. Aşama (SG)	500
2. Aşama (TG)	6455
3. Aşama (SG+TG)	3915

*Sonuçlar 55 günün sonunda elde edilen değerlerdir.

Üretilen biyogazların metan içerikleri gaz detektörü ile SG için %22 ve TG için %61 olarak ölçülmüştür.

Mikrobiyal ve besin açısından oldukça zengin olan SG’nden biyogaz üretiminin diğer bir hayvansal atık olan TG’ne göre oldukça az olmasının iki sebebi olduğu düşünülmektedir. Bunlardan ilki, mineral açıdan zengin olan SG’nin, TG’ne göre daha az organik madde içermesi olabilir. Deneysel çalışmalarda kullanılan SG’nin organik madde miktarı %23 iken bu değer tavuk gübresinde %63 civarında elde edilmiştir. Bir diğer neden ise, deneylerde başlangıçta reaktörlere aşı konulmaması olabilir. Tez kapsamındaki tüm deneysel çalışmalar; reaktörde ilk aşamada bulunan oksijenli ortamda oksijenin tükenerek biyogazın oluşumunu sağlayan mikroorganizmaların aktifleştirmesine yardımcı olacak aşılama işlemi yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bu durum ise SG’nden biyogaz üretimini etkileyecek nedenlerden biri olarak düşünülmektedir.

Tez çalışmasında ayrıca sistemin matematiksel modelleme çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara, modifiye edilmiş Logistic ve Gompertz modelleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlara göre SG ile TG için Logistic, SG+TG karışımı için ise Gompertz modelinin daha iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Üzerine yapılan bilimsel araştırmalar giderek artmasına rağmen kullanımı Türkiye’de istenilenden az seviyede olan SG’nden biyogaz üretimi çalışmasında SG’nin diğer hayvansal atıklardan daha az biyogaz ürettiği gözlenmiştir. Ancak yapılan bilimsel çalışmalar arttıkça SG’nin biyogaz üretiminde ve/veya tarımda daha önemli bir yere sahip olacağı açıktır. SG besin içeriği açısından toprakta verimin artırılması amacı ile kullanılırken biyogaz kaynağı olarak da kullanılabilir. Bu çalışmada, çok az da olsa biyogaz elde edilmiş olması bunun bir göstergesi niteliğindedir. SG’den biyogaz elde

edilmesi çalışmalarının başlangıçta reaktöre aşılama yapılarak denenmesi ise SG'nin biyogaz verimliliğinin belirlenmesinde önemli bir adım olacaktır. Bu noktada bu yüksek lisans tezi, ileride SG ile yapılması planlanan biyogaz üretim çalışmalarına katkı sağlayacak niteliktedir. Ayrıca, kullanılan hammaddeye göre mekanik veya termik ön işlem uygulaması da biyogaz üretim verimini artırabilir. Yine, SG'nin diğer hammaddeler ile karıştırılarak biyogaz veriminin incelenmesi de ayrı araştırma konusu olarak değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Çelikkaya, H., Biyogaz, Fırat Kalkınma Ajansı, 2016.
- [2] Anonim, Bitkisel ve Hayvansal Atıklardan Kojenerasyon Uygulamaları, http://www.evf.gov.tr/content/files/Konusmaci_Sunumlari/turk-konusmacilar/Sedat-Akar-Bitkisel-ve-Hayvansal-Atiklar-ile-Kojenerasyon.pdf, Erişim Tarihi: 28.07.2021.
- [3] Aslanlı, Ş., Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi Üzerine Çeşitli Bor Bileşenlerinin Etkinliğinin Araştırılması, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [4] Buğutekin, A., Atıklardan Biyogaz Üretiminin İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi ABD, Doktora Tezi, 2007.
- [5] Sabuncu, Ö.C., Biyogaz Üretiminin Teknik, Ekonomik Ve Çevresel Analizi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [6] Seadi, T.A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R., Biogas Handbook, no.1. Esbjerg: University of Southern Denmark, 2008.
- [7] H. Deviren and C. İlkılıç, Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri, Elazığ Üniversitesi, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2011.
- [8] Tunçel, S., Büyükbaş Hayvan Gübresi Ve Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretiminin ADM1 Kullanılarak Modellenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temi Tükenmez Enerjiler ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [9] Yağlı H. ve Koç Y., Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Belirlenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, (34)3, 38, 2019.
- [10] W. Asvapoositkul, J. Joraden, and S. Wongwises, “Asian Journal on Energy and

- Environment,” vol. 6, no. 3, 154–164, 2005.
- [11] N. J. Themelis, “NAWTEC12-2231 Combining Anaerobic Digestion and Waste-To-Energy,” 265–271, 2004.
- [12] M. and D. C. Davis, Introduction to Environmental Engineering. New York: WCB/McGraw-Hill, 1998.
- [13] Anonim, Biyogaz Kılavuzu Üretimden Kullanıma. https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/editordosya/biyogaz_kilavuzu.pdf, Erişim Tarihi: 28.07.2021
- [14] Schulz, H. und Eder, B. (2006): Biogas - Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3. vollst. überarb. u. erweiterte Auflage, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, ISBN 978-3-936896-13-8
- [16] Quiroga, G. vd., Physico-chemical analysis and calorific values of poultry manure, Waste Management, 30 (5), 880-884, 2010.
- [17] Anonim, T.C. Kocaeli Valiliği Gıda Tarım Ve Hayvancılık İl Müdürlüğü, Solucan Gübresi Üretimi, <https://kocaeli.tarimorman.gov.tr/Belgeler/> Erişim Tarihi: 28.07.2021
- [18] C. A. Edwards and P. J. Bohlen, Biology and Ecology of Earthworms, New York: USA: Chapman and Hall, 1996.
- [19] Dayar, N., Türkiye’de Solucan Gübresi Üretiminin Ekonomik Analizi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Ekonomisi ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [20] Anonim, <http://www.infersol.net/solucan-gubresi-nasil-uretilir/>. Erişim Tarihi: 28 07 2021.
- [21] Anonim, <https://www.ekosol.net/bilgiler/ekosas>. Erişim Tarihi: 28 07 2021.
- [22] Anonim, https://www.gubreler.com/solucan-gubresi-uretim-tesisi-maliyetleri_371.htm. Erişim Tarihi: 28 07 2021.
- [23] Öztuncay, M.K., Türkiye’de Biyogaz Enerjisinin Kullanılabilirliği ve Ekonomikliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2009.

- [24] Eyidoğan, M., Biyogazın Saflaştırılması ve Motorlu Taşıt Yakıtı Olarak Kullanılması, Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Umuttepe Kampüsü, 2008.
- [25] Güç, A., Büyükbaş Hayvan Atığından Biyogaz Üretimi Ve Uşak İli İçin Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi ABD, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [26] Yıldız, Ş. vd. , Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi (Biyometanizasyon) Projesi – İstanbul Örneği, Türkiye’de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, 1-8, 2009.
- [27] İllez, B., Türkiye'nin Enerji Görünümü:Türkiye’de Biyokütle Enerjisi, p. 319, 2020.
- [28] Ardiç, İ., Termal, Kimyasal ve Termokimyasal Önişlemlerin Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretimine Etkileri, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği ABD, Yüksek Lisans Tezi 2003.
- [29] Chen, G. vd., Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production, Waste Management, 30(10), 1834-1840, 2010.
- [30] Deepanraj, B. vd. Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste. International Journal of Hydrogen Energy, 42 (42), 26522 – 26528, 2017.
- [31] Braeutigam, P. vd., Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production, Biomass and Bioenergy, 63, 109-113, 2014.
- [32] Elissen, H. and R. van der Weide, Methane production from insect, worm and mushroom waste streams and combinations. Wageningen Research, Report WPR-817, 22, 2019.
- [33] Samsunlu, A. Çevre Mühendisliği Kimyası, 4. Baskı, Sam-Çevre Teknolojileri Merkezi Yayınları, İstanbul. 255-271, 1999.
- [34] Gül, N., Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2006.

- [35] Şenol, H., Sığır Gübresi, Mısır Silajı Ve Şeker Pancarı Küspesinden Termal, Kimyasal Ve Fiziksel Ön İşlemler Uygulanarak Biyogaz Üretiminin İncelenmesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği ABD, Doktora Tezi, 2019.
- [36] Anonim, <https://cevre.erciyes.edu.tr/upload/M4A8NIR5-kati-madde-tayini.pdf>, Erişim Tarihi: 28 07 2021.



ÖZGEÇMİŞ

Ersin TEKE ilk, orta ve lise eğitimini Giresun'da tamamladı. 2009 yılında Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2013 yılında bitirdi. 2017 yılında Giresun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Türk Standartları Enstitüsü'nde inceleme uzmanı olarak başladı. Halen Türk Standartları Enstitüsü'nde inceleme uzmanı olarak görev yapmaktadır.