



**T.C.  
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİĞİR GÜBRESİ, MISIR SİLAJI VE ŞEKER PANCARI  
KÜSPESİNDEN TERMAL, KİMYASAL VE FİZİKSEL ÖN  
İŞLEMLER UYGULANARAK BİYOGAZ ÜRETİMİNİN  
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Halil ŞENOL  
(201492122253)**

**Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ünsal AÇIKEL**

**SİVAS  
OCAK 2019**

**Halil ŞENOL'un hazırladığı ve "ŐIĐIR GÜBRESİ, MISIR SİLAJI VE ŞEKER PANCARI KÜSPESİNDEN TERMAL, KİMYASAL VE FİZİKSEL ÖNİŞLEMLER UYGULANARAK BİYOGAZ ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.**

**Tez Danışmanı Prof. Dr. Ünsal AÇIKEL**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

**Jüri Üyesi Prof. Dr. Meltem SARIOĞLU CEBECİ**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

**Jüri Üyesi Prof. Dr. YeŐim SAĞ AÇIKEL**  
Haccettepe Üniversitesi

**Jüri Üyesi Prof. Dr. Hasan Hüseyin DURMAZUAR**  
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

**Jüri Üyesi Doç. Dr. Feridun DEMİR**  
Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıŐtır.

**Prof. Dr. İsmail ÇELİK**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



*Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından **M-665** Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Halil ŞENOL, 2019



Çalışma sırasında bana destek olan aileme, hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma...

## ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

14.06.2019

Halil ŞENOL

## **KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR**

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ünsal AÇIKEL'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren Arş. Gör. Şefik ARICI hocama, deney düzeneğinin kurulumu, çalışma analizlerinin yapılmasına yardım eden çalışma arkadaşım Arş. Gör. Emre AŞKIN ELİBOL'a, her türlü desteğini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Öğr. Gör. Erkan GÜLER, Arş. Gör. Ferdi ÖZBİLGİN, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali DERELİ, Doç. Dr. Özge CAĞCAĞ YOLCU, Öğr. Gör. Volkan ODA hocama ve çalışmada bana yardım eden öğrencilerime, şükranlarımı sunarım. Çalışmalarında her türlü desteklerini esirgemeyen eşim Merve ŞENOL'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

# SIĞIR GÜBRESİ, MISIR SİLAJI VE ŞEKER PANCARI KÜSPESİNDEN TERMAL, KİMYASAL VE FİZİKSEL ÖN İŞLEMLER UYGULANARAK BİYOGAZ ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ

**Halil ŞENOL**

**Doktora Tezi**

**Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ünsal AÇIKEL**

**2019, 175 + xxv sayfa**

Bu çalışmada taze sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesi karışımlarından anaerobik koşullarda biyogaz üretimi incelenmiştir. Anaerobik fermantasyonda ön işlemsiz koşullarda, sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesi farklı oranlarda karıştırılarak optimum kütlece karışım oranı sırasıyla 2:1:1 olarak belirlenmiştir. Bu karışım oranının toplam suda çözünmesi % 42,1 ve biyogaz üretim hızı 180,5 ml/g KM olarak gerçekleşmiştir. Bu karışım oranına sırasıyla termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultrases dalgası ön işlemleri uygulanmıştır.

Termal ön işlemler 100, 120, 150 ve 180 °C'de 10, 20, 30, 60 ve 120 dakika sürelerde uygulanmıştır. En yüksek biyogaz verimi, 180 °C'de 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 362,1 ml/g KM değerinde olmuştur ve % 100,6 daha fazla biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Termal ön işlem sonucunda % 48,9 daha fazla su çözünme sağlanmıştır. KOİ giderimi bu reaktörde % 80 oranında gerçekleşmiştir.

Alkali ön işlemler 8N KOH ve 8N NaOH çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. Reaktöre alkali miktarı, reaktörde bulunan katı madde oranının kütlece % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30'u kadar eklenmiştir. NaOH ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 20'si kadar alkali eklenen reaktörde 288,7 ml/g KM miktarında olup, % 59,9 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 32,4 oranında, KOİ giderimi % 69,0 oranında gerçekleşmiştir. KOH ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 15'i kadar alkali eklenen reaktörde 301,2 ml/g KM miktarında olup, % 66,8 daha fazla biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 30,5 oranında, KOİ giderimi % 73,1 oranında gerçekleşmiştir.



Asit ön işlemler kütlece % 15'lik  $H_2SO_4$  ve kütlece % 15'lik  $HNO_3$  çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. Reaktöre asit miktarı, reaktörde bulunan katı madde oranının kütlece % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30'u kadar ayrı ayrı eklenmiştir.  $H_2SO_4$  ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 20'si kadar asit eklenen reaktörde 258,5 ml/g KM miktarında olup, % 43,2 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 32,4 oranında, KOİ giderimi % 66,1 oranında gerçekleştirilmiştir.  $HNO_3$  ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 20'si kadar asit eklenen reaktörde 301,4 ml/g KM miktarında olup, % 66,9 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 26,6 oranında, KOİ giderimi % 66,1 oranında gerçekleştirilmiştir.

Termokimyasal ön işlemler kütlece % 15'lik  $H_2SO_4$ , kütlece % 15'lik  $HNO_3$ , 8N KOH ve 8N NaOH çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. Reaktöre asit ve alkali miktarı, reaktörde bulunan katı madde oranının kütlece % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30' u kadar ayrı ayrı eklenmiştir. Asit termokimyasal ön işlemler sonucunda  $H_2SO_4$ -termal ön işlemi,  $HNO_3$ -termal ön işleminden daha etkili olmuştur.  $H_2SO_4$ -termal ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 10' u kadar asit eklenen reaktörde 355,6 ml/g KM miktarında olup, % 97,0 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 55,8 oranında, KOİ giderimi % 75,4 oranında gerçekleştirilmiştir. Alkali-termokimyasal ön işlemler sonucunda KOH-termal ön işlemi, NaOH-termal ön işleminden daha etkili olmuştur. KOH-termal ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu % 10'u kadar asit eklenen reaktörde 458,4 ml/g KM miktarında olup, % 153,9 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 90,5 oranında, KOİ giderimi % 87,1 oranında gerçekleştirilmiştir.

Ultrases dalgası ön işlemi 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 kj şiddetinde ve sırasıyla 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika sürelerde uygulanmıştır. Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda en yüksek biyogaz oluşumu 100 kj şiddetinde ve 20 dakika uygulanan ön işlem koşulları altında 270,6 ml/g KM miktarında olup, % 49,9 daha fazla üretim gerçekleşmiştir. Aynı reaktörde fazla suda çözünme % 90,5 oranında, KOİ giderimi % 67 oranında gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesinin anaerobik fermantasyondaki optimum kütlece karışım oranına uygulanan termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultases dalgası ön işlemleri sonucunda biyogaz veriminde artış

incelenmiştir. Biyogaz verimini en fazla artıran ön işlem termokimyasal ön işlemler olmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Biyogaz, Anaerobik fermantasyon, Termal ön işlem, Asidik ön işlem, Akali ön işlem, Termokimyasal ön işlem, Ultrases dalgası ön işlemi.



## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF BIOGAS PRODUCTION BY APPLYING THERMAL, CHEMICAL AND PHYSICAL PRETREATMENTS FROM CATTLE MANURE, CORN SILAGE AND SUGAR BEET PULP**

**Halil ŞENOL**

**Phd thesis**

**Department of Chemical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ünsal AÇIKEL**

**2019, 175 + xxv pages**

In this study, biogas production was investigated from fresh cattle manure, corn silage and sugar beet pulp mixtures under anaerobic conditions. In anaerobic digestion conditions, cattle manure, corn silage and sugar beet pulp were mixed in different ratios and the optimum mass mixture ratio was determined as 2:1:1, respectively. The total water dissolution rate was 42.1% and the biogas production rate was 180.5 ml/g TS. Thermal, alkaline, acid, thermochemical and ultrasonic wave pretreatments were applied to this mixture ratio, respectively.

Thermal pretreatments were applied at 100, 120, 150 and 180 °C for 10, 20, 30, 60 and 120 min. The highest biogas yield was 362.1 ml/g TS in the reactor treated at 180 °C for 60 min and 100.6 % incremental yield was achieved. As a result of the thermal pretreatment, 48.9 % incremental water dissolution was achieved. sCOD removal was 80 % in this reactor.

Alkaline pretreatments were performed with 8N KOH and 8N NaOH solutions. The amount of alkali to the reactor was added to 5 %, 10 %, 15 %, 20 % and 30 % of the solids content in the reactor. As a result of the NaOH pretreatment, the highest biogas production was 288.7 ml/g TS in 20 % alkaline added reactor and 59.9 % incremental production. In the same reactor, water dissolution was realized as 32.4 % and sCOD removal was 69.0 %. As a result of KOH pretreatment, the highest biogas formation was

301.2 ml/g TS in the reactor with alkaline added up to 15 % and 66.8 % incremental production was realized. In the same reactor, incremental water dissolution was 30.5 % and sCOD removal was 73.1 %.

Acid pretreatment was carried out with 15 % by mass of  $H_2SO_4$  and 15 % by mass of  $HNO_3$  solutions. The amount of acid to the reactor was added separately to 5 %, 10 %, 15 %, 20 % and 30 % of the solids content of the reactor. As a result of the  $H_2SO_4$  pretreatment, the highest biogas production amounted to 258.5 ml/g TS in the reactor with acid addition of 20 % and 43.2 % incremental yield was realized. In the same reactor, water dissolution was realized as 32.4 %, removal of COD by 66.1 %. As a result of  $HNO_3$  pretreatment, the highest biogas formation was 301.4 ml / g TS in the reactor with 20 % acid addition, and 66.9 % incremental production was realized. In the same reactor, incremental water dissolution was realized as 26.6 %, COD removal was 66.1 %.

Thermochemical pretreatments were performed with 15 % by mass  $H_2SO_4$ , 15 % by mass of  $HNO_3$ , 8N KOH and 8N NaOH solutions. The amount of acid and alkali in the reactor was separately added up to 5 %, 10 %, 15 %, 20 % and 30 % of the solids content of the reactor. As a result of acid thermochemical pretreatments,  $H_2SO_4$ -thermal pretreatment was more effective than  $HNO_3$ -thermal pretreatment. The highest biogas formation as a result of  $H_2SO_4$ -thermal pretreatment was 355.6 ml/g TS in the reactor with 10 % acid addition and 97.0 % incremental yield was realized. In the same reactor, incremental water dissolution was realized as 55.8 %, removal of COD by 75.4 %. As a result of alkaline-thermochemical pretreatments, KOH-thermal pretreatment was more effective than NaOH-thermal pretreatment. As a result of KOH-thermal pretreatment, the highest biogas formation was 458.4 ml/g TS in the reactor with 10 % acid addition. In the same reactor, incremental water dissolution was 90.5 % and COD removal was 87.1 %.

The ultrasound wave pretreatment was applied at 5, 10, 20, 30, 50 and 100 kj and 5, 10, 20, 30 and 60 minutes respectively. As a result of the ultrasound wave pretreatment, the highest biogas production amounted to 270.6 ml/g TS at the rate of 100 kj and under pretreatment conditions applied for 20 min. In the same reactor, incremental water dissolution was 90.5 % and COD removal was 67 %.

As a result, an increase in biogas yield was investigated as a result of thermal, alkaline, acid, thermochemical and ultases wave pretreatment applied to optimum mass mixture

ratio of cattle manure, corn silage and sugar beet pulp in anaerobic digestion. The pretreatment which increased the biogas yield was thermochemical pretreatments.

**Keywords:** Biogas, Anaerobic digestion, Thermal pretreatment, Acidic pretreatment, Alkali pretreatment, Thermochemical pretreatment, Ultrasound waves pretreatments.



# İÇİNDEKİLER

sayfa

<b>ÖZET</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xviii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xxii
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xxiv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. ÇALIŞMANIN AMACI</b> .....	3
<b>3. GENEL BİLGİLER</b> .....	4
3.1 Anaerobik Fermantasyon ile Biyogaz Üretimi.....	4
3.1.1 Biyogaz oluşum aşamaları .....	4
3.1.1.1 Hidroliz aşaması .....	5
3.1.1.2 Asidojenez aşaması .....	5
3.1.1.3 Asetojenez aşaması.....	5
3.1.1.4 Metanojenez aşaması.....	6
3.2 Biyogaz Üretimine Etki Eden Faktörler .....	7
3.2.1 C/N oranı .....	8
3.2.2 Sıcaklık .....	9
3.2.3 Hidrolik bekleme süresi (HBS) .....	11
3.2.4 Organik yükleme hızı (OYH).....	11
3.2.5 Karıştırıcı etkisi .....	12
3.2.6 Basınç etkisi .....	13
3.2.7 pH ve alkalinite etkisi .....	13
3.2.8 Besi ortamının etkisi.....	14
3.2.9 Amonyak konsantrasyonu .....	15
3.3 Biyogaz Saflaştırma Yöntemleri.....	16
3.4 Biyogaz Üretimi İçin Kullanılan Güncel Ön işlemler .....	19
3.4.1 Fiziksel ön işlemler .....	22
3.4.2 Kimyasal ve fizikokimyasal ön işlemler .....	23
3.4.3 Biyolojik ön işlemler .....	24
3.5 Biyogaz Üretimi İçin Kullanılan Genel Program ve Modeller .....	26
3.5.1 CFD (Computational fluid dynamics).....	26
3.5.2 RSM (Response surface methodology) .....	27

3.5.3 ADM1 (IWA anaerobic digestion model no.1 ) .....	28
3.5.4 Gompertz denklemi .....	29
3.5.5 Bushwell denklemi .....	30
3.6 Biyogazın Kullanım Alanları .....	31
3.7 Biyogaz Üretiminde Yan Ürün Olarak Fermente Gübre .....	31
<b>4. LİTERATÜR ÖZETLERİ .....</b>	<b>33</b>
<b>5. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>39</b>
5.1 Çalışmada Kullanılan Hammaddeler ve Hazırlanması .....	39
5.2 Çalışmada Kullanılan Hammaddelere Yapılan Analizler .....	39
5.2.1 Nem ve kuru madde analizi .....	39
5.2.2 Kül ve organik madde analizi .....	39
5.2.3 KOİ analizleri .....	40
5.2.4 Selüloz analizleri .....	40
5.2.5 Hemiselüloz analizleri .....	40
5.2.6 Lignin analizleri .....	40
5.2.7 Elementel analiz .....	40
5.2.8 SEM analizleri .....	41
5.2.9 Biyogaz içeriğinin analizleri .....	41
5.3 Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar ve Deney Düzenekleri .....	41
5.4 Çalışmada Uygulanan Ön İşlem Teknolojileri .....	50
5.4.1 Termal ön işlemler .....	50
5.4.2 Alkali ön işlemler .....	50
5.4.3 Asidik ön işlemler .....	50
5.4.4 Termokimyasal ön işlemler .....	50
5.4.5 Ultrases dalgası ön işlemleri .....	51
5.4.6 Uygulanan ön işlemler sonucunda suda çözünürlüğün belirlenmesi .....	51
5.5 Anaerobik Fermantasyon İşlemleri .....	51
5.6 Anaerobik reaktöre CFD analizlerinin Uygulanması .....	52
<b>6. BULGULAR .....</b>	<b>55</b>
6.1 Reaktörlere uygulanan CFD analiz sonuçları .....	55
6.2 Kullanılan Organik Maddeye Uygulanan Analiz Sonuçları .....	55
6.2.1 Optimum karışım oranı belirleme çalışmaları .....	56
6.2.2 Termal ön işlem sonuçları .....	59
6.2.2.1 Termal ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç .....	60
6.2.2.2 Termal ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci .....	63
6.2.2.3 Termal ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi .....	67

6.2.2.4 Termal ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim.....	68
6.2.2.5 Termal ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri.....	70
6.2.3 Alkali ön işlem sonuçları.....	73
6.2.3.1 Alkali ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç.....	74
6.2.3.2 Alkali ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci .....	75
6.2.3.3 Alkali ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi .....	76
6.2.3.4 Alkali ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim.....	77
6.2.3.5 Alkali ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri .....	78
6.2.4. Asidik ön işlem sonuçları .....	80
6.2.4.1 Asidik ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç .....	81
6.2.4.2 Asidik ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci.....	82
6.2.4.3 Asidik ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi.....	84
6.2.4.4 Asit ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim.....	85
6.2.4.5 Asit ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri .....	86
6.2.5. Termokimyasal ön işlem sonuçları.....	88
6.2.5.1 Termokimyasal ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç.....	89
6.2.5.2 Termokimyasal ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci .....	92
6.2.5.3 Termokimyasal ön işlem sonucunda toplanan biyogaz analizi .....	96
6.2.5.4 Termokimyasal ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim.....	96
6.2.5.5 Termokimyasal ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri .....	99
6.2.6. Ultrases dalgası ön işlem sonuçları .....	102
6.2.6.1 Ultrases dalgası ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç .....	103
6.2.6.2 Ultrases dalgası ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci.....	107
6.2.6.3 Ultrases dalgası ön işlem sonucunda toplanan biyogaz analizi .....	112
6.2.6.4 Ultrases dalgası ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim.....	112
6.2.6.5 Ultrases dalgası ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri.....	115
6.3 Standart Sapmalar ve Belirsizlik Analizleri .....	120
<b>7. SONUÇLARIN LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....</b>	<b>121</b>
7.1 Termal Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	121
7.2 Alkali Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	123
7.3 Asit Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	126
7.4 Termokimyasal Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	128



7.5 Ultrases Dalgası Ön işlem Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	130
<b>8. ÖNİŞLEMLER UYGULANARAK ÜRETİLEN BİYOGAZIN İSTATİSTİKSEL ANLAMDA DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>131</b>
<b>9. ÖNİŞLEMLER UYGULANARAK ÜRETİLEN BİYOGAZIN MODELLENMESİ ....</b>	<b>135</b>
<b>10.TARTIŞMA .....</b>	<b>159</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>165</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>175</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Şekil 3.1</b>	Anaerobik fermantasyonda metanojenik bakterilerin büyüme oranları.....	10
<b>Şekil 3.2</b>	Lignoselülozik bir bileşenin yapısı.....	19
<b>Şekil 3.3</b>	Selülozun molekül yapısı.....	20
<b>Şekil 3.4</b>	Hemiselülozun molekül yapısı.....	20
<b>Şekil 3.5</b>	Ligninin molekül yapısı.....	21
<b>Şekil 3.6</b>	Ön işlem uygulanan lignoselülozik bir bileşenin yapısı.....	22
<b>Şekil 3.7</b>	CFD programının biyogaz reaktörü içerisinde karıştırıcı etkisinin görsel olarak tanımlanması.....	26
<b>Şekil 3.8</b>	pH ve katı yüzdesi bağımsız değişkenleri kullanarak oluşturulan RSM grafiği.....	27
<b>Şekil 3.9</b>	Eklenik metan üretimi eğrisinin şematik gösterimi.....	30
<b>Şekil 5.1</b>	Altın nanopartikül ile kaplanmadan önceki ve sonraki organik numune görüntüsü ile SEM cihazı.....	42
<b>Şekil 5.2</b>	Organik numunelerin altın nanoparçacıklarla kaplanma görüntüsü.....	42
<b>Şekil 5.3</b>	Asit ve alkali ön işlem uygulanan organik numuneler.....	43
<b>Şekil 5.4</b>	Portatif biyogaz ölçüm cihazı.....	43
<b>Şekil 5.5</b>	Çalışmada kullanılan pH metre.....	44
<b>Şekil 5.6</b>	Çalışmada kullanılan manyetik karıştırıcı.....	44
<b>Şekil 5.7</b>	Çalışmada kullanılan UV-vis spektrofotometre.....	45
<b>Şekil 5.8</b>	Çalışmada kullanılan otoklav.....	45
<b>Şekil 5.9</b>	Çalışmada kullanılan santrifüj.....	46
<b>Şekil 5.10</b>	Çalışmada kullanılan etüv.....	46
<b>Şekil 5.11</b>	Çalışmada kullanılan ultrases dalga cihazı.....	47
<b>Şekil 5.12</b>	Çalışmada kullanılan hassas terazi.....	47
<b>Şekil 5.13</b>	Çalışmada kullanılan kül fırın.....	48
<b>Şekil 5.14</b>	Anaerobik fermantasyon düzeneği.....	49
<b>Şekil 6.1</b>	Anaerobik reaktörün sıcaklık dağılımının 2 boyutlu gözlemlenmesi.....	55
<b>Şekil 6.2</b>	Optimizasyon çalışmalarındaki 19 adet reaktörün anaerobik süreci.....	59
<b>Şekil 6.3</b>	100 °C' de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci.....	61
<b>Şekil 6.4</b>	120 °C' de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci.....	61
<b>Şekil 6.5</b>	150 °C' de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci.....	62
<b>Şekil 6.6</b>	180 °C' de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci.....	62
<b>Şekil 6.7</b>	100 °C' de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi.....	63
<b>Şekil 6.8</b>	120 °C' de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi.....	64
<b>Şekil 6.9</b>	150 °C' de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi.....	64
<b>Şekil 6.10</b>	180 °C' de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi.....	65
<b>Şekil 6.11</b>	Termal ön işlem sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim.....	66
<b>Şekil 6.12</b>	Ön işlem uygulanmayan organik maddenin SEM görüntüleri.....	70
<b>Şekil 6.13</b>	100 °C de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri.....	70
<b>Şekil 6.14</b>	120 °C' de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri.....	71
<b>Şekil 6.15</b>	150 °C' de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri.....	72
<b>Şekil 6.16</b>	180 °C' de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri.....	72

<b>Şekil 6.17</b>	Farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç.....	74
<b>Şekil 6.18</b>	Farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç .....	74
<b>Şekil 6.19</b>	Farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi .....	75
<b>Şekil 6.20</b>	Farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi .....	76
<b>Şekil 6.21</b>	Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri .....	78
<b>Şekil 6.22</b>	KOH ön işlemi sonucunda oluşan SEM görüntüleri .....	79
<b>Şekil 6.23</b>	NaOH ön işlemi sonucunda oluşan SEM görüntüleri.....	79
<b>Şekil 6.24</b>	Farklı oranlarda H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltileri eklenmesi sonucunda oluşan anaerobik süreç.....	81
<b>Şekil 6.25</b>	Farklı oranlarda HNO <sub>3</sub> çözeltileri eklenmesi sonucunda oluşan anaerobik süreç .....	81
<b>Şekil 6.26</b>	Farklı oranlarda H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi .....	82
<b>Şekil 6.27</b>	Farklı oranlarda H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi .....	83
<b>Şekil 6.28</b>	Asit-Alkali ön işlem sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim.....	84
<b>Şekil 6.29</b>	Ön işlemsiz organik numunenin SEM görüntüleri .....	86
<b>Şekil 6.30</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ön işlemi uygulanan numunenin SEM görüntüleri.....	86
<b>Şekil 6.31</b>	HNO <sub>3</sub> ön işlemi uygulanan numunenin SEM görüntüleri .....	87
<b>Şekil 6.32</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç.....	89
<b>Şekil 6.33</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO <sub>3</sub> eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç.....	90
<b>Şekil 6.34</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç.....	91
<b>Şekil 6.35</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç.....	91
<b>Şekil 6.36</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci .....	92
<b>Şekil 6.37</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO <sub>3</sub> eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci .....	93
<b>Şekil 6.38</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci .....	93
<b>Şekil 6.39</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci .....	94
<b>Şekil 6.40</b>	Termokimyasal ön işlem sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim.....	95
<b>Şekil 6.41</b>	Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri .....	99
<b>Şekil 6.42</b>	KOH-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri.....	99
<b>Şekil 6.43</b>	NaOH-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri .....	100
<b>Şekil 6.44</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri .....	101
<b>Şekil 6.45</b>	HNO <sub>3</sub> -termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri.....	101
<b>Şekil 6.46</b>	5 kJ şiddetinde ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	103

<b>Şekil 6.47</b>	10 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	104
<b>Şekil 6.48</b>	20 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	105
<b>Şekil 6.49</b>	30 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	105
<b>Şekil 6.50</b>	50 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	106
<b>Şekil 6.51</b>	100 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç.....	106
<b>Şekil 6.52</b>	5 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	107
<b>Şekil 6.53</b>	10 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	108
<b>Şekil 6.54</b>	20 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	109
<b>Şekil 6.55</b>	30 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	109
<b>Şekil 6.56</b>	50 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	110
<b>Şekil 6.57</b>	100 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi.....	111
<b>Şekil 6.58</b>	Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri .....	115
<b>Şekil 6.59</b>	5 kJ ve 30 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	115
<b>Şekil 6.60</b>	10 kJ ve 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	116
<b>Şekil 6.61</b>	20 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	117
<b>Şekil 6.62</b>	30 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	117
<b>Şekil 6.63</b>	50 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	118
<b>Şekil 6.64</b>	100 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri .....	118
<b>Şekil 7.1</b>	R <sub>13</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	140
<b>Şekil 7.2</b>	R <sub>23</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	141
<b>Şekil 7.3</b>	R <sub>29</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	142
<b>Şekil 7.4</b>	R <sub>33</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	143
<b>Şekil 7.5</b>	R <sub>38</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	144
<b>Şekil 7.6</b>	R <sub>43</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	144
<b>Şekil 7.7</b>	R <sub>47</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	145
<b>Şekil 7.8</b>	R <sub>53</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	146
<b>Şekil 7.9</b>	R <sub>58</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	147

<b>Şekil 7.10</b>	R <sub>61</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	148
<b>Şekil 7.11</b>	R <sub>66</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	149
<b>Şekil 7.12</b>	R <sub>72</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	150
<b>Şekil 7.13</b>	R <sub>76</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	151
<b>Şekil 7.14</b>	R <sub>83</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	152
<b>Şekil 7.15</b>	R <sub>89</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	153
<b>Şekil 7.16</b>	R <sub>92</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	154
<b>Şekil 7.17</b>	R <sub>97</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	155
<b>Şekil 7.18</b>	R <sub>103</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	156
<b>Şekil 7.19</b>	R <sub>107</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	157

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### sayfa

<b>Çizelge 3.1</b>	Anaerobik fermantasyon sürecinin basamakları.....	7
<b>Çizelge 3.2</b>	Bazı organik atıkların C/N oranları .....	8
<b>Çizelge 3.3</b>	Mezofilik şartlarda bazı organik atıkların ortalama HBS .....	11
<b>Çizelge 3.4</b>	Anaerobik fermantasyonda bazı besi maddelerinin inhibisyona başlama ve toksik sınır değerleri.....	15
<b>Çizelge 3.5</b>	20 °C sıcaklık ve 1 atm basınç altında bazı gazların suda çözünürlüğü.....	17
<b>Çizelge 3.6</b>	Biyogaz üretiminde kullanılan güncel ön işlemler .....	25
<b>Çizelge 6.1</b>	Organik atığa uygulanan bazı analiz sonuçları .....	56
<b>Çizelge 6.2</b>	Optimum karışım oranı çalışmaları sonucunda biyogaz üretim hızları .....	57
<b>Çizelge 6.3</b>	Optimizasyon çalışmaları sonucunda reaktörlerin oluşturduğu biyogaz içeriği .....	58
<b>Çizelge 6.4</b>	Organik atığa uygulanan termal ön işlem sonuçları .....	60
<b>Çizelge 6.5</b>	Termal ön işlem sonucunda biyogaz içerik analizi.....	67
<b>Çizelge 6.6</b>	Termal ön işlem öncesi ve sonrasında hammaddenin içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarı.....	68
<b>Çizelge 6.7</b>	Organik atığa uygulanan alkali ön işlem sonuçları.....	73
<b>Çizelge 6.8</b>	Alkali ön işlem sonucunda biyogaz içerik analizi .....	76
<b>Çizelge 6.9</b>	Alkali ön işlem sonucunda lignoselülozik bileşenlerdeki değişim .....	77
<b>Çizelge 6.10</b>	Organik atığa uygulanan asit ön işlem sonuçları .....	80
<b>Çizelge 6.11</b>	Asidik ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi .....	84
<b>Çizelge 6.12</b>	Asit ön işlem sonucunda lignoselülozik bileşenlerdeki değişim .....	85
<b>Çizelge 6.13</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan hammaddelerin anaerobik fermantasyon sonuçları.....	89
<b>Çizelge 6.14</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan hammaddeden oluşan biyogaz analizi.....	96
<b>Çizelge 6.15</b>	Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan.....	97
<b>Çizelge 6.16</b>	Ultras ses dalgası ön işlemini uygulanan organik maddenin anaerobik fermantasyon sonuçları .....	102
<b>Çizelge 6.17</b>	Ultras ses dalgası ön işlemini sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi .....	112
<b>Çizelge 6.18</b>	Ultras ses dalgası ön işlemini sonucunda organik maddenin anaerobik fermantasyon sonrasında selüloz ve hemiselülozun suda çözünme değerleri.....	113
<b>Çizelge 6.19</b>	Çalışmada yapılan analizlerin standart sapmaları.....	120
<b>Çizelge 7.1</b>	Termal ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması.....	121
<b>Çizelge 7.2</b>	Termal ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	122
<b>Çizelge 7.3</b>	Alkali ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	123
<b>Çizelge 7.4</b>	Alkali ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	124
<b>Çizelge 7.5</b>	Asit ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	126

<b>Çizelge 7.6</b>	Asit ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	127
<b>Çizelge 7.7</b>	Termokimyasal ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	128
<b>Çizelge 7.8</b>	Termokimyasal ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması.....	129
<b>Çizelge 7.9</b>	Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması.....	130
<b>Çizelge 7.10</b>	Ön işlem koşullarının biyogaz üretimi üzerinde istatistiksel değerlendirilmesi .....	132
<b>Çizelge 7.11</b>	Termal ön işlem sıcaklıklarının biyogaz üretim hızı üzerindeki tukey testi.....	136
<b>Çizelge 7.12</b>	Termokimyasal ön işlem sürelerinin biyogaz üretim hızı üzerindeki tukey testi ....	132
<b>Çizelge 7.13</b>	Ultrases dalgası ön işlem koşullarının biyogaz üretimi üzerindeki tukey testi.....	133
<b>Çizelge 7.14</b>	Çeşitli ön işlem koşullarında maksimum biyogaz üreten reaktörler.....	135
<b>Çizelge 7.15</b>	Büyüme eğrilerini tahmin etmede kullanılan Sigmoidal modeller ve denklemleri.....	136
<b>Çizelge 7.16</b>	Modifiye edilmiş Bertalanffy ve Logistic modelleri .....	137
<b>Çizelge 7.17</b>	Modifiye edilmiş Logistic ve Bertalanffy sabitleri.....	137
<b>Çizelge 7.18</b>	Modifiye edilmiş Logistic ve Bertalanffy denklemlerinin denklemlerinin deneysel veriler ile belirlenmiş sabitleri .....	138

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>O</b>	Dietil eter
<b>μ</b>	Spesifik biyogaz üretim hızı (ml/g KM.gün)
<b>A</b>	Maksimum biyogaz üretim hızı (ml/g KM)
<b>C/N</b>	Karbon Azot Oranı
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub></b>	Perasetik asit
<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub></b>	Hekzan
<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH</b>	Etanol
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub></b>	Etilen glikol
<b>C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O</b>	Aseton
<b>C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub></b>	Etil asetat
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Kalsiyum karbonat
<b>CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub></b>	Dikloro metan
<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	Metanol
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metan
<b>CNG</b>	Sıkıştırılmış doğal gaz (compressed natural gas)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>Cu</b>	Bakır
<b>dm<sup>3</sup></b>	Desimetre küp
<b>g</b>	Gram
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrojen gazı
<b>H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	Karbonik asit
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Hidrojen peroksit
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Hidrojen sülfür
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Sülfürik asit
<b>HBS</b>	Hidrolik bekleme süresi
<b>HNO<sub>3</sub></b>	Nitrik asit
<b>K</b>	Potasyum
<b>Kg</b>	Kilogram
<b>Kkal</b>	Kilo kalori
<b>KOH</b>	Potasyum hidroksit
<b>KOİ</b>	Kimyasal oksijen ihtiyacı
<b>kPa</b>	Kilopaskal
<b>kWh</b>	Kilowatt saat
<b>L</b>	Litre
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>Mg</b>	Magnezyum
<b>mg</b>	Miligram
<b>mg</b>	Miligram
<b>MS</b>	Mısır silajı
<b>N<sub>2</sub></b>	Azot
<b>NaOH</b>	Sodyum hidroksit
<b>O<sub>2</sub></b>	Oksijen



<b>OYH</b>	Organik yükleme hızı
<b>P</b>	Fosfor
<b>RSM</b>	Responce surface methodology
<b>S</b>	Sülfür
<b>SEM</b>	Scanning electron microscopy
<b>SG</b>	Sığır gübresi
<b>ŞPK</b>	Şeker pancarı küspesi
<b>TK</b>	Toplam katı
<b>TS</b>	Total solids
<b>TOK</b>	Toplam organik karbon
<b>UAKM</b>	Uçucu askında katı madde
<b>UYA</b>	Uçucu yağ asitleri
<b>UK</b>	Uçucu katı
<b>VS</b>	Volatile solid
<b>W</b>	Watt
<b>y</b>	Biyogaz üretimi (ml/g KM)
<b>Zn</b>	Çinko
<b>λ</b>	Gecikme süresi (gün)

## 1. GİRİŞ

Ülkelerin sanayi ve nüfus açısından hızla büyümesi ile birlikte özellikle endüstride önemli ilerlemeler kaydeden ülkelerde enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Enerji ihtiyacının artması, fosil kökenli yakıtların (kömür, petrokok, linyit, doğalgaz vb.) azalmasına yol açmaktadır. Jeotermal enerji, rüzgar, hidro, dalga ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları dünyadaki enerji tüketiminin yaklaşık % 14' üne, sadece biyokütle ise yaklaşık % 10' una katkı sağlamaktadır [1].

Enerji ihtiyacı bugün dünyada önemli bir sorun oluşturmaktadır. Dünyamız ortalama; % 33,1 petrol, % 30,3 kömür, % 23,7 doğal gaz ve % 5 nükleer enerji olmak üzere toplamda yaklaşık olarak % 92' sini tükenmekte olan enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise dünya enerji kaynaklarının yaklaşık % 8' ini oluşturmaktadır. Tükenmekte olan doğal enerji kaynakları dünyayı yeni bir enerji arayışı içerisine sokmuştur. Bu enerji gereksinimine, tükenmekte olan doğal gazın yerini tutan ve yenilenebilen enerji statüsünde yer alan biyogaz da dahildir. Biyogaz organik maddelerden anaerobik fermantasyon yöntemi ile üretilmektedir. Biyogazın içeriğinde bulunan metan gazı yanıcılık özelliği vermektedir. Yüksek performans, düşük maliyet, enerji eldesi gibi avantajlarından dolayı yüksek su içerikli atıkların anaerobik fermantasyon işlemi, son yıllarda, genellikle tercih edilen bir prosestir. Özellikle, evsel ve endüstriyel atıksuların, hayvan gübresi ve katı atıkların arıtımında anaerobik arıtım uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Anaerobik arıtım yöntemi, yaygın olarak kullanılan diğer arıtım teknikleri ile karşılaştırıldığında daha az enerji ve besin kaynağı gerektirmektedir. Ayrıca, düşük işletme maliyeti ile birlikte, ısı ve elektrik enerjisinde kullanılacak uygun formda metan gazı elde etme imkânı, anaerobik arıtım yöntemi ile sağlanmaktadır. Anaerobik arıtım sonucunda elde edilen metan gazı; elektrik üretimi için gaz motorlarında, buhar üretimi için kazanlarda doğrudan kullanılabilir. 18. yüzyılda, organik maddelerin ayrışması sonucu metan gazı oluştuğu, 19. yüzyılın ortalarında ise bu ayrışmanın bakterilerden kaynaklandığı belirlenmiştir. Biyogaz teknolojisinin ilk uygulandığı ülke Danimarka olup, merkezi biyogaz tesisleri kavramı bu ülkede geliştirilmiştir. Danimarka'da 20' den fazla biyogaz tesisi vardır ve biyogaz üretimi yılda 2,4 PJ'dür. Nüfusun az olmasından dolayı teknolojik gelişmelere uyum sağlaması ile birlikte tesis sayısı 1998'den günümüze kadar değişim göstermemiştir. Tesislerin biyogaz üretim kapasiteleri günde 25 ila 500 ton

arasında değişim göstermektedir. Hayvansal gübre, arıtma çamuru ve endüstriyel katı atıklar karıştırılarak kullanılmaktadır [2]. Günde üretilen biyogaz miktarı yaklaşık 1.000 m<sup>3</sup> ve 15.000 m<sup>3</sup> arasında değişmekte olup, tesis boyutuna ve hammaddenin yapısına bağlı olarak değişmektedir. Tesislerde, % 80 gübre ve % 20 organik içerikli mezbaha atıkları ile birlikte, gıda endüstrisi ve belediye atık çamurları ile ön çürütme yapılmaktadır [3].

Biyogaz üretiminde organik içeriği yoğun olan her türlü atığı hammadde olarak kullanmak mümkündür. Önemli hammadde kaynaklarından biri de hayvan dışkılarıdır. Hayvan dışkıları doğrudan yakma ve gübre olarak kullanma olmak üzere iki şekilde değerlendirilmektedir. Doğrudan yakmada biyogaza göre elde edilen enerji çok düşük olmakla birlikte geriye kalan kül ise kullanılamaz duruma gelmektedir. Ayrıca hayvan dışkısının gübre olarak kullanılması için gerekli tepkimelerinin sağlanması için bekletilmesi gerekir ki bunun için fazla zamana ve geniş alana gerek duyulmaktadır. Bunun yanı sıra dışkı, biyogaz üretim koşullarında, denetimli bir şekilde bekletildiğinden doğaya verilen metan gazı azalır. Elde edilen bu dışkıların anaerobik olarak arıtılması ülke ekonomisine katkıda bulunmakla birlikte insan sağlığı ve çevre için de olumsuzlukların önüne geçer. Hayvan dışkılarının biyogaz üretiminde değerlendirmesi durumunda bu sorunlar giderilmiş olur. Böylece hem enerji elde edilmiş hem de atıklar gübre haline dönüştürülmüş olur [4].

## 2. ÇALIŞMANIN AMACI

Anaerobik fermantasyonda organik atıkları bir arada değerlendirmek son zamanlarda oldukça önem kazanmıştır. Bu çalışmada sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesinin belirli oranlarda karıştırılarak optimum karışım oranının bulunması çalışmanın temel amacını oluşturmuştur. Bununla birlikte analizler sonucunda belirlenen optimum bulunan karışım oranına termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultrases dalgalarının belirli oranlarda uygulanması ile biyogaz üretimi üzerindeki verim farklılıklarının belirlenmesi ve anaerobik fermantasyonda kullanılan organik maddelere ön işlem teknolojilerinin uygulanması sonucu lignoselülozik bileşenlerdeki giderim oranlarının saptanması, çalışmanın diğer amaçları olmuştur.



### **3. GENEL BİLGİLER**

#### **3.1. Anaerobik Fermantasyon ile Biyogaz Üretimi**

Biyogaz, biyokütlenin anaerobik çürüme ile oksijensiz ortamda işlenmesi sonucunda elde edilen yanıcı bir gazdır. Aynı zamanda biyogaz, organik atıkların belirli oranlarda su ile karıştırılmaları sonucu oksijensiz ortamda (anaerobik fermantasyon) oluşabilen bir gazdır. Biyogaz içeriğinde yaklaşık olarak % 50 - 80 metan (CH<sub>4</sub>), % 20-50 karbondioksit (CO<sub>2</sub>), % 0,1-1 oranında azot (N<sub>2</sub>) , % 0,01-0,2 oranında oksijen (O<sub>2</sub>) ve 10-4000 ppm oranında hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S) bulunmaktadır. Biyogazın yanıcılık özelliği doğal gazın yerini tutan metan gazından kaynaklanmaktadır. Biyogaz, yanıcı diğer gazlardan farklı olarak sadece hayvansal veya bitkisel gibi organik atıklardan elde edilmesidir. İçerdiği metan gazı, biyogazın ısıl değerini oluşturan ana maddedir. Metan, karbondioksite göre doğada 23 kat daha fazla sera etkisine neden olur. Bu bakımdan hayvansal, bitkisel ve endüstriyel atıklardan biyogaz elde edilmesi, ekonomik getirisinin yanı sıra çevreci bir yaklaşıma da sahiptir. 1 m<sup>3</sup> biyogazın sağladığı ısı miktarı 4700 - 5700 kcal'dir. Bu değer 0,62 litre gaz yağı, 1,46 kg odun kömürü, 3,47 kg odun, 0,43 kg bütan gazı, 12,3 kg tezek, 4,70 kWh elektrik enerjisi eşdeğerindedir. 1 m<sup>3</sup> biyogaza eşdeğer yakıt miktarları ise 0,66 litre motorin 0,75 litre benzin 0,25 m<sup>3</sup> propan tarafından sağlanan enerjiye eşdeğerdir. Doğalgaz ile kullanım alanları hemen hemen aynı olan biyogaz, çok yönlü bir enerji kaynağı olarak doğrudan ısıtma ve aydınlatma amacıyla kullanıldığı gibi, elektrik enerjisine ve mekanik enerjiye çevrilerek kullanımı da (gaz türbini-jeneratör, kojenerasyon, yakıt pilleri) mümkün olmaktadır. Eğer bu gaz sıkıştırılırsa tıpkı sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) olarak motorlu araçlarda yakıt olarak da kullanılabilir. Ayrıca biyogaz üretimi sonucu ortaya çıkan yan ürünlerde çeşitli amaçlarla kullanılabilir. Oluşan yan ürün doğrudan gübre olarak kullanılabilir [5].

##### **3.1.1. Biyogaz oluşum aşamaları**

Anaerobik fermantasyonda biyogaz oluşum aşamaları mikrobiyal açıdan; hidroliz, asidojeniz, asetojenez ve metanojeniz olmak üzere 4 bölüme ayrılmaktadır. Bu 4 bölüme ayırma işlemi aynı türdeki bakterilerin ortak faaliyetleri ve kendi içlerindeki etkileşimleri göz önüne alınarak yapılmıştır [6].

### **3.1.1.1. Hidroliz aşaması**

Bu aşamada organik madde bakterilerin kolayca kullanabileceği daha küçük bileşenlere dönüşür. Bu aşamada ölü bakterilerin yıkımı ve hücre bileşenlerinin geri kazanımı da sağlanmış olmaktadır. Çözünür formda olmayan organik moleküller bu aşamada çözünür forma geçebilmektedir [7].

Proteinler aminoasitlere, karbonhidratlar 6 C'lu basit şekerlere, yağlar yağ asitleri ve gliserola, büyük zincirli yağ asitleri de daha küçük zincirli yağ asitlerine dönüşürler. Bu aşamadaki hidrolitik bakteriler metanojen bakterilere göre daha geniş koşullarda faaliyet gösterirler (pH= 5-7) [8].

Hidroliz aşamasında karbonhidratlar birkaç saatte parçalanırken, yağ ve proteinlerin hidrolizi günlerce sürebilir. Selülozun hidrolizi kısıtlıdır. Ligninin ise anaerobik fermantasyonda hidrolizi yoktur. Hidroliz aşaması anaerobik fermantasyon için hız belirleyici bir basamaktır. Bu aşama ne kadar uzarsa metanojenez fazına geçiş de o kadar uzamaktadır [9].

### **3.1.1.2. Asidojenez aşaması**

Bu aşama asit oluşturma aşaması olarak da bilinmektedir. Anaerobik sistemlerde reaksiyonların en hızlı gerçekleştiği aşamadır. Bu aşamada oluşabilen bakteriler fakültatif anaerob oldukları için ortamda bulunan çözünmüş ve bağlı oksijenden faydalanabilmektedirler. Birçok hidrolize olmuş organik madde asetik aside ve daha sonra CH<sub>4</sub> ile beraber CO<sub>2</sub> çevrilirler. Asetik asit miktarı anaerobik şartlarda organik maddenin çevrimi sırasında önemli bir rol üstlenmiştir. Bu prosesin dengesi bozulursa H<sub>2</sub> tüketimi yeterince sağlanamaz ve bu nedenle yağ asitleri oluşmaya başlar [9].

### **3.1.1.3. Asetojenez aşaması**

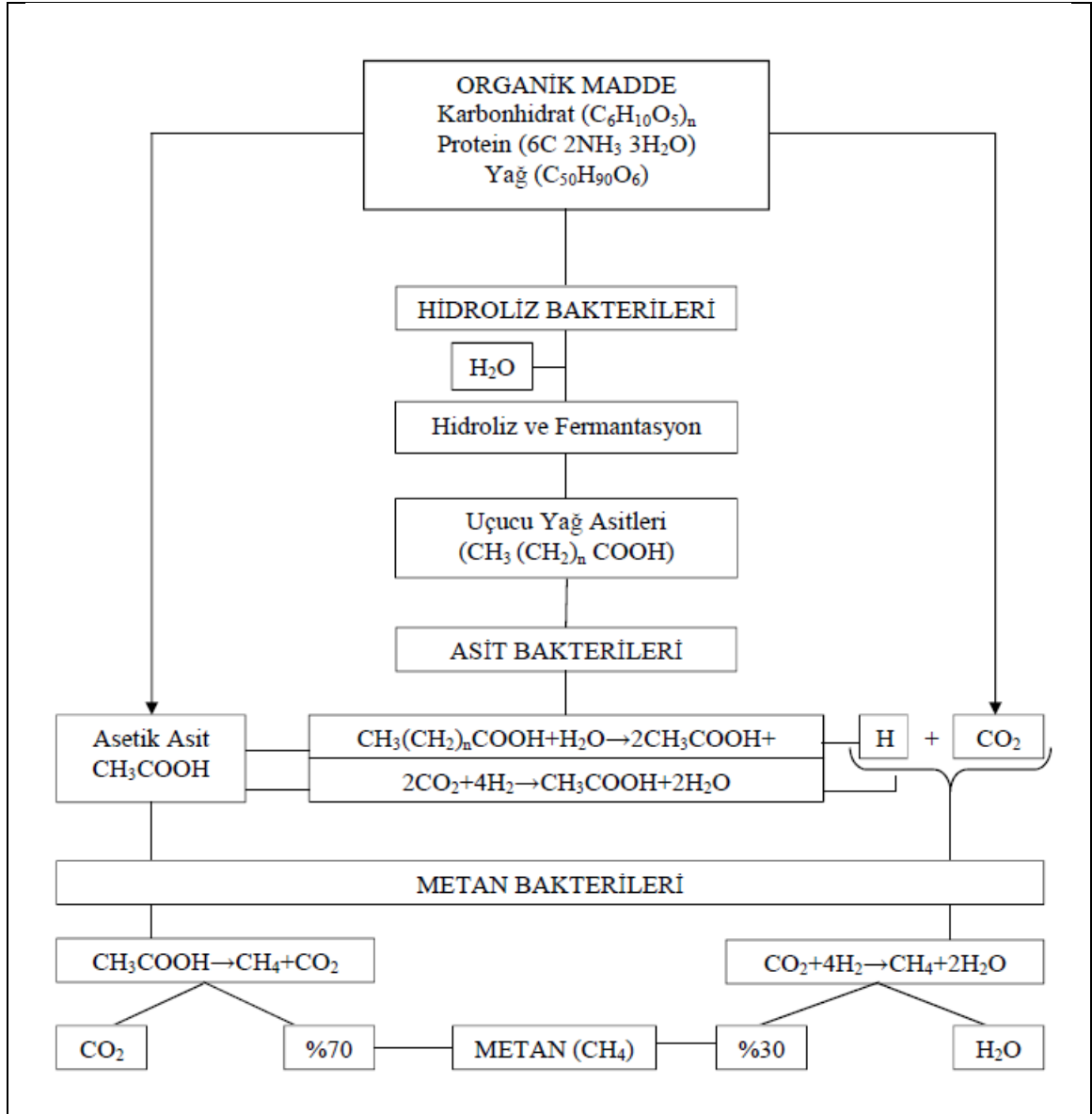
Bu aşama anaerobik yıkım süresince en önemli adım olan metanojenez için substrat sağlamakla sorumludur. Asetat üreten bakterilerle metanojenler simbiyotik bir ilişki içerisinde. Bu aşamada H<sub>2</sub> gazı asetojenler tarafından genellikle yan ürün ya da substrat olarak kullanılabilir. Asetojenez aşamasında üretilen asetatı tüketmek için metanojen bakteriler ve sülfat indirgeyebilen bakteriler bir yarış içerisinde girebilmektedir. H<sub>2</sub>S üretim aşaması da bu evrededir. Bu aşamada sülfidojenler ve metanojenler sülfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), asetat (CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>), H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub>'yi kullanma yarışına girebilmektedirler. Sülfidojenler

metanojenlere göre çok daha fazla substrat kullanabilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle anaerobik proseslerde H<sub>2</sub>S konsantrasyonları değişiklik gösterebilmektedir [9].

#### **3.1.1.4. Metanojenez aşaması**

Metanojen bakteriler hücre duvarlarının değişik yapısı nedeniyle uçucu yağ asitlerinin (UYA) toksik etkilerine karşı hassas davranış gösterirler. Metanojen bakteriler genellikle sulu ortamlarda doğal olarak çürümüş organik maddeler üzerinde, bataklık ve göllerin çamurlarında bulunabilir. Aynı zamanda metanojenler insan ve hayvanların sindirim ürünlerinde de bulunabilmektedir. Geviş getiren hayvanların rumenlerinde, geviş getirmeyen hayvanların ise kalın bağırsağının başlangıcında bulunmaktadır [10]. Bu kapsamda çizelge 3.1'de anaerobik fermantasyon sürecinin biyokimyasal akış şeması verilmektedir [11].

**Çizelge 3.1** Anaerobik fermantasyon sürecinin basamakları [11].



### 3.2. Biyogaz Üretimine Etki Eden Faktörler

Tüm kimyasal ve biyolojik süreçlerde olduğu gibi anaerobik süreçlerde de çevresel şartlar metan oluşumuna etki etmektedir. Bunlar; yükleme oranı etkisi, sıcaklık etkisi, karıştırma etkisi, bekleme süresi etkisi, C/N oranı etkisi, besi ortamı etkisi, pH etkisi, alkanite etkisi ve toksik madde etkisidir.



### 3.2.1. C/N oranı

Biyogaz üretiminde optimum C/N oranının bazı kaynaklara göre 10-23 arasında, bazı kaynaklara göre ise 25-30 arasında olması gerektiği vurgulanmıştır [12,13]. Anaerobik süreçlerde azot, çürüme sürecinde parçalanmayı sağlayan mikroorganizmaların çoğalması için gerekli olan proteini, karbon ise enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Eğer üretim yapılacak substrat maddenin C/N oranı 30'u geçerse süreç yavaşlar ve üretimin tamamlanması için daha fazla süreye ihtiyaç olur. Böylece üretimin verimi düşmüş olur. Eğer sulu karışımın C/N oranı 10'un altında kalırsa bu sefer amonyak oluşur ve bu da mikroorganizmaların çalışmalarını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca kötü koku oluşmasına sebep olur. Mikroorganizma aktivitesi yavaşlayacağından yine üretim verimi düşer [14,15].

İnekler gibi geviş getiren hayvanların taze gübrelерinde azot daha az miktarda bulunmaktadır. Bunun nedeni sindirim sırasında bakterilerin azotun bir bölümünü kullanmasıdır. Bu nedenle bazı atıklara göre C/N oranı yüksek olabilmektedir [16]. C/N oranlarının istenilen değere ayarlanması için farklı besleme meteryalleri ile karıştırılması gerekmektedir. Örneğin C/N oranı 5-14 olan tavuk gübresi ile C/N oranı 50-80 olan saman karışımı iyi bir besleme olabilmektedir [17]. Benzer şekilde bitki atıklarında bulunan C/N oranının değeri 100 olan bitkisel organik atıkları kompostlama ile bir haftada 20' ye kadar düşebilmektedir [18].

Çizelge 3.2'de bazı organik atıkların C/N oranları verilmiştir [19-25].

Organik Madde	C/N oranları
Taze sığır gübresi	6-20
Pirinç atığı	50-78
Mısır koçanı	50
Koyun atığı	20-33
At atığı	24-25
Tavuk atığı	3-15
Kuru ot	10-27
Sebze atıkları	35
İnsan atıkları	3-10
Mutfak atıkları	10-29
Odun talaşı	200
Çim artıkları	15-19
Yulaf samanı	48-83
Domuz atığı	3-20
Mezbaha atıkları	2

### 3.2.2.Sıcaklık

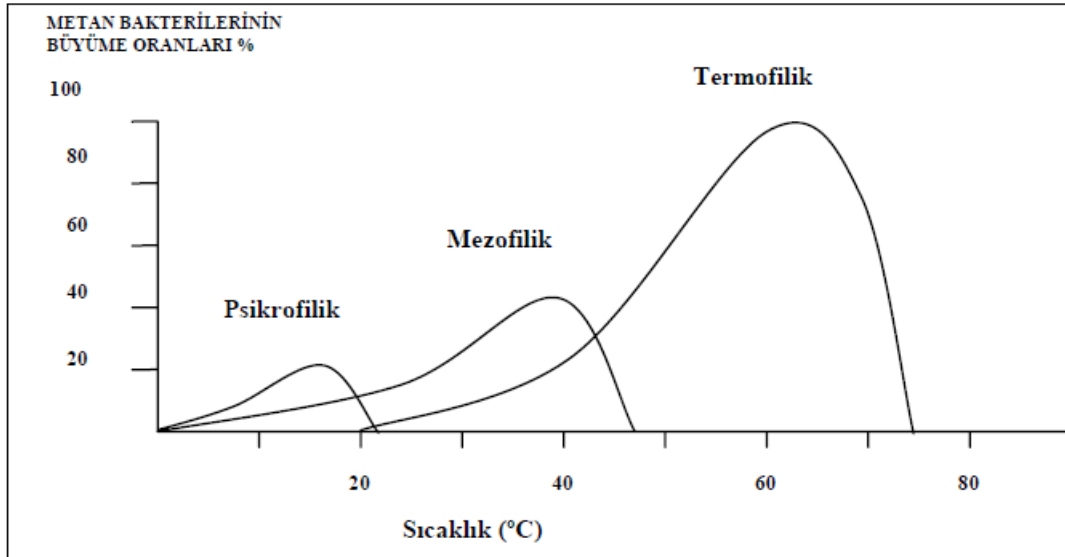
Anaerobik fermantasyon aşamasında sıcaklık aralığı 3 °C ile 70 °C arasında olması kabul edilebilir olarak belirlenmiştir [26]. Bazı kaynaklarda 85 °C'nin üzerinde yaşayabilen metan bakterileri tespit edilmiştir [27]. Sıcaklığın azalması ile asitleşme oluşumuna oranla metan oluşumuna çok daha fazla etki etmektedir. Sıcaklığın artmasıyla fermantasyon sürece kısalmaktadır [28]. Anaerobik süreçlerde mikroorganizmaların biyolojik yapısına göre 3 farklı sıcaklık bölgesi vardır [29]. Bu sıcaklık bölgeleri;

1. Psikrofilik şartlar (3 - 20 °C): Bu sistemlerde çürütme hızı çok yavaş olup ortalama bekleme süresi 100 - 300 gün arasındadır.
2. Mezofilik şartlar (20 - 40 °C): Anaerobik fermantasyonda en çok uygulanan sıcaklık bölgesidir. Bekleme süreleri 20 - 40 gün arasında değişir.
3. Termofilik şartlar (40 - 70 °C): Çürütme hızı daha yüksek, dolayısıyla bekleme süreleri daha kısadır.

Psikrofilik sıcaklık bölgesinde çalışmalar verimliliğin az olması ve anaerobik fermantasyon süresinin uzun olması açısından nispeten azdır. Fakat bazı yapılan çalışmalarda düşük yükleme hızlarında başarılı sonuçlar alınmıştır. Örneğin Mezofilik bölge için organik yükleme oranı 1-3 kgVS/m<sup>3</sup>-reaktör. gün iken psikrofilikte bu oran 0,01-0,24 kg UK/m<sup>3</sup>-reaktör.gün olmaktadır. Ayrıca psikrofilik fermantasyonda besleme materyalinin TK oranı % 5' in altındadır [30]. Aynı zamanda düşük sıcaklıkta biyogazın içerisindeki metan oranı daha fazla olmaktadır [31]. Fakat 9-15 °C' nin altında biyogaz üretimi yok denecek kadar azdır [32]. Mezofilik bölgede optimum sıcaklık 35-37 °C'dir. Hava sıcaklığının düşük olduğu aylarda, reaktör sıcaklığının 35 °C'den 38 °C'ye çıkarılması, sıcaklık yükselişle artan biyogaz miktarından daha fazla tüketime neden olabilmektedir [33]. Biyogaz üretim proseslerinde genellikle mezofilik bölge tercih edilmektedir. Termofilik bölgede verim daha fazladır fakat daha maliyetlidir. Bazı çalışmalarda termofilik reaktörlerin, serbest amonyak inhibasyonu nedeniyle, mezofilik reaktörlerden daha az verimli olduğu ya da bir fark olmadığı, yüksek enerji girdilerinden dolayı termofilik olanların tercih edilmediği belirtilmektedir [34]. Biyogaz üretim proseslerinde 42 - 50 °C sıcaklıkları arasında bir kırılma oluşmaktadır. Bu sıcaklıklarda ne termofilik ve mezofilik bakteriler aktivite gösteremezler [35]. 60 °C'nin üzerine çıkıldığı zaman sığır gübresi üretimlerinden yapılan çalışmalarda gaz üretiminin zaman zaman yavaşladığı hatta durduğu tespit edilmiştir [36]. Bazı çalışmalarda ise 50 °C' de alınan

verim 60 °C' den daha fazla olmuşmuş. Bu durum ise yüksek sıcaklıkta amonyak miktarının artmasıyla açıklanmıştır [37].

Büyük sıcaklık farkı anaerobik fermentasyon proseslerinde toksik etki yapmaktadır [38]. Metanojenler ani sıcaklık farklarından yüksek oranda etkilenirler. Eğer günlük sıcaklık değişimleri 5 °C' den fazlaysa, metanojenler faaliyetlerini durdurur ve asitleştirme devam ettiğinden pH düşer [39]. Mezofilik şartlarda anaerobik fermentasyon için izin verilen saatlik sıcaklık dalgalanması  $\pm 1$  °C olmaktadır [35]. Fakat sıcaklık dalgalanmalarının bakteriler üzerindeki etkisi uzun olmadığı durumlarda, çalışma sıcaklığına dönüldüğünde sistem tekrar dengeye gelebilmektedir [40]. Sıcaklığın yükselmesi enzimlerin aktivitelerini arttırmakta fakat yapılarını bozmaktadır. Termofilik reaktörlerde 3 °C 'lık sıcaklık değişimleri sistemin yavaşlamasına neden olur. Saatlik izin verilen maksimum sıcaklık değişimi 0,5 °C olarak kabul edilmelidir [22,35]. Bu nedenle sıcaklık kontrolü için termofilik şartlarda daha hassas kontrol yöntemleri tercih edilmelidir. Bu durumda ilk yatırım maliyetini arttırmaktadır. Termofilik şartlarda yukarı yönde oluşan kısa zamanlı sıcaklık dalgalanmaları, aşağı yönde olan sıcaklık dalgalanmalarından daha fazla etki ettiği sonucuna varılmıştır. Reaktör sıcaklığının 50 °C olduğu bir çalışmada, günlük 10 °C sıcaklık dalgalanmasında biyogaz üretiminde % 12' lik bir düşüş olduğu belirtilmiştir [41].



Şekil 3.1 Anaerobik fermentasyondametanojenik bakterilerin büyüme oranları

### 3.2.1. Hidrolik bekleme süresi (HBS)

Biyoreaktörde organik maddelerin anaerobik bakteriler tarafından çürütülmesi sonucu biyogazın üretilmesi için gerekli olan süreye hidrolik bekleme süresi denilmektedir. Bu süre içerisinde organik maddelerin % 70-80 oranında reaksiyona girerek anaerobik olarak çürüdüğü varsayılır. Anaerobik proseslerde çalışma sıcaklığına bağlı olarak hidrolik bekleme süresi 20 - 120 gün arasında değişiklik gösterebilmektedir. Tropikal bölgelerde ise HBS değeri 40 - 50 gün arasında değişiklik göstermektedir. Sürekli beslemeli sistemlerde ise HBS süresi daha uzun seçilebilmektedir. HBS süresinin düşürülmesi, çürütülecek materyale bağlı olarak değişiklik göstermektedir. HBS yeterli olmazsa biyoreaktörden bakteriler daha hızlı uzaklaşır ve uçucu yağ asidi konsantrasyonu artar. Bu da biyogaz üretim veriminin düşmesine neden olur. Fermantasyon tam olarak gerçekleşmez. Bu problem, tarımsal biyogaz tesislerinde nadiren gerçekleşir [42]. Çizelge 3.3'te anaerobik fermantasyonun hidrolik bekleme süresi verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Mezofilik şartlarda bazı organik atıkların ortalama HBS

Materyal HBS (gün)	Materyal HBS (gün)
Sıvı sığır gübresi	12 – 30
Saman yataklı sığır gübresi	18 – 36
Sıvı domuz gübresi	10 – 25
Bitki ile karıştırılmış sığır gübresi	50 – 80
Sıvı tavuk gübresi	20 – 40

Hidrolik bekleme süresinin artırılması, biyoreaktörde bulunan organik maddeler içerisindeki selüloz içeriğinin anaerobik sindirimini sağladığından birim atık başına elde edilen biyogaz miktarını arttırmaktadır [43].

### 3.2.2. Organik yükleme hızı (OYH)

Organik yüklenme hızı metreküp başına reaktöre günlük olarak beslenen organik madde miktarı olarak ifade edilir. Anaerobik proseslerde metanojenler organik yükleme hızına karşı oldukça hassas davranırlar. Organik yüklenme hızı biyoreaktöre yüklenen günlük madde miktarının biyoreaktör hacmine oranı ile hesaplanmaktadır. Organik beslemenin kuru madde oranı, günlük beslenen madde miktarı ile çarpılarak beslenen kuru madde oranı hesaplanmaktadır. Mezofilik şartlarda çalışan bir biyoreaktörde sığır gübresi için optimum OYH 2,5 - 3,5 kg UK/m<sup>3</sup>.gün; ilave besin maddeli sığır gübresi için 5,0-7,0 kg UK/m<sup>3</sup>.gün ve domuz gübresi için 3,0 - 3,5 kg UK/m<sup>3</sup>.gün alınmaktadır. Anaerobik arıtma esnasında mümkünse optimum organik yükleme hızı korunması gerekmektedir. Organik

yükleme hızı yüksek olduğunda fermentör içinde uçucu yağ asidi birikmesi olur ve pH düşer. pH'ın düşmesi metanojenik bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Buda gaz üretim hızını azaltır ya da durdurur. Benzer şekilde organik besleme hızı düştüğü zaman gaz üretim hızı düşer [42]. Yükleme oranı yüksek olması durumunda, ortamın pH değeri düşer ve reaktör içinde inhibisyon oluşur. Bunun nedeni ise metanojenlerin H<sub>2</sub> gazını yeterli hızda uzaklaştıramaması sonucunda asit bakterilerinin baskın hale gelmesi ve uçucu organik asit üretiminin artarak asit birikiminin oluşmasıdır. Bu da sistemin dengesinin bozulmasına neden olur [44]. Bu duruma engel olmak için yüklenme oranını azar azar artırmak gerekmektedir [45].

Katı madde oranı düşük olursa, materyal içerisindeki katının çökmesi meydana gelir. Bu oran gereğinden daha yüksek olursa gaz çıkışı engellenir [46]. Beslenen organik maddenin % 8-13 arasında TK'ya sahip olması, biyogaz üretimi için uygun olmaktadır. Hayvan atıklarının toplanırken suyun fazla kullanılması durumunda TK oranı % 2-5'e kadar düşebilmektedir. Bu da suyu ısıtmak için daha fazla enerji harcanması gerektiğinden sistem verimini düşürür [47]. Hayvansal atıkların kullanıldığı yüksek katılı sistemlerde toplam katı içeriği % 22-25'e kadar çıkmaktadır. Böyle proseslerde bekletme süresi genellikle 30 gün olarak gerçekleştirilmektedir [48]. Yüksek katı miktarlarında UYA birikimi yüzünden inhibisyon meydana gelir. Bu nem oranına yakın besleme materyali kullanıldığında, oluşan prosese kuru fermantasyon adı verilir [22].

### **3.2.3. Karıştırıcı etkisi**

Biyoreaktörler de karıştırma, biyogazın reaktörden uzaklaştırılması, bakterilerin daha orantılı dağılması, köpük oluşumu ve çökmenin oluşmasına engel olunması, homojen sıcaklık dağılımının sağlanması açısından önem kazanmaktadır [49]. Eğer biyogaz reaktörlerinde karıştırıcı olmazsa durgun bölgeler oluşabilmektedir. İyi bir karıştırmada biyogaz üretimi % 50 oranında artabilmektedir [50]. Günde 1 kere karıştırmanın sürekli karıştırmaya kıyasla gaz verimini yeterince etkilemediği belirlenmiştir [51]. Aşırı fazla karıştırma durumlarında ise anaerobik bakterilerin birbiri ile teması yok olmakta ve sistem veriminde düşme görülmektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada en uygun karıştırma oranının 4 saatte bir olduğu sonucuna varılmıştır [31]. Karıştırma, sistemin ilk başlangıcında pH miktarını düşürdüğünden dolayı tavsiye edilmez. % 5 kuru madde oranı ile yapılan anaerobik deneylerde karıştırıcılı ve karıştırıcısı olmayan biyoreaktörler arasında verim açısından çok fark yoktur [52]. Fakat % 10 ve üzeri kuru madde içeren

çalışmalarda karıştırma ile anaerobik fermantasyon verimi % 30' lara varan oranda artabilmektedir [53]. Yine % 15 kuru madde içeren ve üzerinde biyogazın sirkülasyonu ile karıştırmanın yeterli olmadığı ifade edilmiştir [54].

#### **3.2.4. Basınç etkisi**

Biyoreaktör içerisindeki basınç anaerobik bakterilere ve üretim verimine etki edebilmektedir. Önceki çalışmalarda biyoreaktörde 0,75-1,5 kPa mutlak basınç aralığı biyogaz üretimi için uygun olduğu ifade edilmiştir [18]. Fakat yapılan bazı çalışmalarda ise reaktörün en alt kısımlarında bulunan metanojenler yüksek hidrolik basınç altında faaliyetlerini sürdürebildiği ve üretim veriminin düşmediği rapor edilmiştir [55]. Yine yapılan başka bir çalışmada ise biyogaz içerisindeki gösterge basıncı 120 kPa sınır değeri basıncı olarak belirlenmiştir [56]. Basınç arttığında metan gazına göre 40 kez daha fazla çözünbilme özelliğine sahip CO<sub>2</sub>' nin sıvı içerisindeki konsantrasyonu artmaktadır. Bu yüzden biyogaz içerisindeki metan oranında yükselir ve asitlik arttığından dolayı pH düşer [57].

#### **3.2.5. pH ve alkalinite etkisi**

Fermantörden çıkan biyogazın oluşum hızına ve biyogaz içindeki CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> oranına alkanite ve pH önemli derecede etki etmektedir. Alkanite fermantörün içindeki karışımın pH'ını 4 yapmak için gerekli asit miktarı olarak tanımlanmaktadır. Alkanite değerinin yüksek oluşu sistemin tamponlama gücünün yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Alkanite değerindeki düşüş ya da gaz içindeki karbondioksit miktarının artışı, pH düşmeden önce anaerobik sürecin dengesinin bozulduğunu belirten bir ölçektir [58]. Anaerobik fermantasyon için 1000 - 5000 CaCO<sub>3</sub> mg/l aralığı anaerobik fermantasyon için yeterlidir [44].

Metanojenler için uygun olan pH aralığı 6,8-7,6 arasındadır [59]. pH'ın 6,6'nın altına düşmesi metanojen faaliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. pH'ın 6,2'ye düşmesi ise toksik etki yaratmaktadır. Bu pH değerinde asit üretimi devam etmekte ve asit bakterilerinin pH değeri 4,5-5,0 olana kadar verimleri devam etmektedir [28].

Anaerobik fermantasyonun başlangıcında pH seviyesinin 6' ya kadar düştüğü belirtilmiştir. Bu asidifikasyon aşamasından kaynaklanmaktadır. Daha sonra metanojenez aşamasında amonyak konsantrasyonunun artmasına paralel olarak pH düzeyi artarak, 7-7,5 arasında dengelenir [60]. Anaerobik sistemlerde pH değeri 7'nin altına doğru düşerse kireç ya da

kül eklenerek pH dengeye getirilebilir fakat 7' nin üzerine kaydığında ise asit ilavesi yapılmamalıdır. Çünkü ortamda H<sub>2</sub>S birikimi artabilmektedir [16].

### **3.2.6. Besi ortamının etkisi**

Anaerobik fermantasyon sürecinde en önemli besinler azot, karbon ve fosforlu bileşiklerdir. Bunların yanında metanojenler bakır, çinko, kobalt, nikel, demir, magnezyum, kalsiyum, potasyum, sülfür bileşenleri ve vitaminlere ihtiyaç duyarlar. Hayvan atıklarında besi ortamı uygun olmaktadır. Fakat bazı bitkisel atıklar ya da evsel atıklardan üretilen sistemlerde ek besi ortamına ihtiyaç duyulabilmektedir [61]. Hidrolitik bakterilerin besi ortamının eksikliklerinden çok fazla etkilenmemesine karşın metanojen bakteriler az bir besin eksikliğinden bile etkilenebilirler [20].

Anaerobik bakteriler aerobik bakterilere göre azot ve fosfor ihtiyaçları % 20 daha azdır. Anaerobik proseslerde karbon miktarının yerine genellikle kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) geçmektedir. Aynı şekilde toplam organik karbon (TOK)'da karbon miktarının yerine geçebilmektedir. Anaerobik prosesler için KOİ:N:P oranı tanımlanmaktadır. Bu oran 100:2;0,2 olmalıdır. Düşük verim için bu oran 1000:5:1 olarak alınırken yüksek verim için ise 350:5:1 olarak alınabilmektedir. Çizelge 3.4'te anaerobik fermantasyonda bazı besi maddelerinin inhibisyona başlama ve toksik sınır değerleri verilmiştir [62].

**Çizelge 3.4** Anaerobik fermantasyonda bazı besi maddelerinin inhibisyona başlama ve toksik sınır değerleri

Element	Temel değeri	Toksik değeri(mg/L)
K	200-400 mg/L	
Mg	75-150 mg/L	3000
Ca	100-200 mg/L	8000
Fe	1-10	-
Cu	-	100-250
Zn	-	200-1000
Mn	0,005-50	1500 üzeri
Ni	0,005-0,5	100-1000
Co	0,01	-
Mo	0,05	-
Se	0,008	-
W	-	-
Na	-	8000
Cr	-	200-2000/500
S	-	100-200
Cn	-	2
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	-	5000
NaCl	-	40.000
N	-	0,05
Cd	-	70-600
Pb	-	8-340
NH <sub>3</sub>	80 ve altı	150
NH <sub>4</sub>		1500-30000
H <sub>2</sub> S	50	1000
Na <sub>2</sub> S	150	600
O <sub>2</sub>	-	0,01
Asetik asit	-	800 üzeri
Propiyonik asit/asetik asit	-	1,4 üzeri.

### 3.2.7. Amonyak konsantrasyonu

Anaerobik fermantasyonda amonyak üretimi hidroliz aşamasında gerçekleşmektedir. Amonyak oluşumu azotlu bileşiklerin anaerobik fermantasyonda yıkımı ile gerçekleşmektedir. Serbest halde bulunan amonyak amonyumdan daha toksikdir. Bu nedenle çözülmüş amonyak ile birlikte çözülmüş amonyumun değerlendirilmesi gerekmektedir. Amonyak ve amonyum iyonunun konsantrasyonları serbest amonyum oluşumuna ve pH'a bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Eğer reaktöre amonyak ilave edilirse, pH artar ve metanojenler aktivitelerini kaybeder. Aynı zamanda UYA'lar artmaktadır. Yüksek H<sup>+</sup> konsantrasyonunda aşağıdaki denklem (3.1)'deki denge reaksiyonu sola kaymaktadır. Bu durumda amonyumun konsantrasyonu artmaktadır. Aynı şekilde düşük H<sup>+</sup> konsantrasyonunda denge reaksiyonu sağa kaymaktadır ve amonyak oluşmaktadır. Örnek olarak pH'ın 8 olduğu durumda ortamda % 93 kadar çözülmüş



amonyum varken % 7 kadar amonyak vardır. C/N oranı 10'un altına düşerse amonyak zehirlenmesi gerçekleşir.



Ortamda fazla miktarda bulunan amonyak miktarı sadece metanojenleri etkilemekle kalmaz aynı zamanda hücre içi katyonik dengeyi de bozabilmektedir. Hücre içinde bulunan amonyum - potasyum dengesi bozulur. Amonyum konsantrasyonu artarsa potasyum konsantrasyonu azalmaktadır. Bu nedenle böyle durumlarda reaktöre benzer karakterde  $\text{Mg}^{+2}$  ve  $\text{Ca}^{+2}$  gibi iz elementleri ilave edilmesi gerekmektedir. Böylece azotlu bileşiklerin kullanıldığı durumlarda serbest amonyak miktarının takip edilmesi gerekmektedir [39].

Amonyak inhibisyon değeri literatürde 100 mg/L'den başlasa da 1900 mg/L'ye kadar sistemin adapte olabileceği gösterilmiştir. Anaerobik süreçlerde en fazla karşılaşılan sorunlardan biri metanojenlerin yüksek amonyak konsantrasyonlarına adapte edilememeleridir. Bu durum amonyak konsantrasyonunun kademeli olarak artırılması ile giderilebilmektedir. Literatürde bazı çalışmalar bu durumu desteklemiştir [63].

### 3.3. Biyogaz Saflaştırma Yöntemleri

Daha önceki yapılan çalışmalarda biyogazın içerisinde % 40 - 70  $\text{CH}_4$ , % 30 - 60  $\text{CO}_2$  ve eser miktarda da  $\text{H}_2\text{S}$  ve su buharı bulunduğu gözlemlenmiştir [64]. Biyogazın içindeki  $\text{CH}_4$  oranını % 70' den daha fazla yapmak için biyogazdan  $\text{CO}_2$  miktarını uzaklaştırmak gereklidir. Aynı şekilde biyogazın içinden alınması gereken diğer bileşenler  $\text{H}_2\text{S}$  ve su buharıdır. Biyogazın saflaştırılması ile ısı değeri artar, korozyon önlenir ve çevre kirliliği azalır [65]. Biyogazın kullanım alanlarından biride motorlu taşıtlardır. Biyogaz motorlu taşıtlarda içeriğindeki  $\text{H}_2\text{S}$  gazının 17 ppm ve  $\text{CH}_4$  oranının % 96'nın üzerinde olması gerektiği savunulmuştur. Bazı ülkelerde ise motorlu taşıtlar için biyogazda en fazla 4-5 ppm  $\text{H}_2\text{S}$  olması gerektiği savunulmuştur. Bu değere getirilen biyogaz sıkıştırılarak doğal gaz gibi kullanılması mümkündür. Saflaştırılmış 1 m<sup>3</sup> biyogaz yaklaşık olarak 1 litre benzin ile eşit enerji değerine sahiptir [66]. Saflaştırılmış biyogaza biyometan denilmektedir. Biyogazın arıtılmasıyla; sıkıştırılmış biyometan, benzin veya dizel yerine kullanılacak sıvı hidrokarbon, metanol, hidrojen ve sıvılaştırılmış biyometan elde edilmektedir. Biyogaz kullanıldığı zaman İsveç'te biyogaz kullanımı konusunda gerçekleştirilen bir uygulamada taşıt emisyon değeri 60.000 km'de motorinle çalışan araçlara göre  $\text{NO}_x$  oranının % 60 daha az, CO oranının % 90 daha az ve hidrokarbon

emisyonlarının da % 80 daha az olduğu açıklanmıştır. Biyogazın içerisinde bulunan CO<sub>2</sub> su buharı ile zayıf asit bağları oluşturur ve korozyona sebep olmaktadır. Biyogazı karbondioksitten korumak için 4 ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; su ile adsorplama, polietilen glikol ile adsorplama, karbon moleküler elek kullanma ve membran ayırma yöntemleridir [9]. Çizelge 3.5'te bazı gazların belirli sıcaklık ve basınçta suda çözünürlüğü verilmiştir.

**Çizelge 3.5** 20 °C sıcaklık ve 1 atm basınç altında bazı gazların suda çözünürlüğü

Gaz	Sudaki Çözünürlüğü (cm <sup>3</sup> /kg su)	Kaynama S. (°C)	Erime S. (°C)	Kritik S. (°C)	Kritik Basınç (bar)
CH <sub>4</sub>	3,3	-161,5	-182,5	-82,1	46,4
CO <sub>2</sub>	85,1	-78,0	-57,0	31,0	73,8
N <sub>2</sub>	1,5	-196,0	-210,0	-146,9	34,0
O <sub>2</sub>	3,0	-183,0	-219,0	-118,6	50,4
H <sub>2</sub> S	25,0	100,0	0	374,0	221,0
H <sub>2</sub>	1,8	-62,0	-83,0	100,4	90,1

Çizelge 3.5'te bazı gazların normal şartlar altında çözünürlüğü verilmiştir [67]. Bu sayede gazların adsorpsiyonu hesaplanabilmektedir. Su içinden CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve NH<sub>3</sub> adsorplayarak biyogazın saflaştırılması düşük maliyetli ve sürekli uygulanan bir sistemdir [68]. Su içinden geçen gaz su buharına doymun hale gelmektedir ve bu gaz eğer sıkıştırılacaksa kurutulması gerekmektedir. Çizelge 3.4'e göre yaklaşık olarak 1 litre suda 1,8 gram CO<sub>2</sub> çözünürken, sadece 4 mg CH<sub>4</sub> gazı çözünmektedir. Biyogazın su ile giderilmesi ile yaklaşık olarak % 90 - 95 oranına kadar metan gazı elde edilebilmektedir. Arıtma suyunun içerisinde zararlı sülfürler ve kirlenme olmaktadır. Bu nedenle suyun değiştirilmesi gerekmektedir. Arıtılan karbondioksit seralarda kullanılmaktadır. Elde edilen CO<sub>2</sub> kuru buz üretiminde kullanılmaktadır. 1 m<sup>3</sup> biyogazdan ortalama 0,4 kg kuru buz elde edilebilmektedir [69]. İçinde bir miktar su bulunan adsorpsiyon kulesinin alt kısmından biyogaz gönderilir ve suyun içinden biyogaz geçerken CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S adsorplanmaktadır. Bu şekilde çözme kapasitesi dolan su değiştirilmektedir. Metan gazı ise suda çözünmediğinden adsorpsiyon kulesinin üst kısmından dışarı alınmaktadır. Bu şekilde nemli bir metan gazı elde edilmiş olmaktadır. Bu gaz bir kurutucudan geçirilerek içindeki nem alınmaktadır. Aynı şekilde içinde CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S çözülmüş suda desorpsiyon kulesinde ayrıştırılarak tekrar tekrar kullanılabilir özelliğine sahiptir [66]. Üretilen biyogaz 5 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 10 N KOH çözeltilerinin içinden geçirilerek saflaştırılabilir [70]. CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gideriminde cam malzemedan yapılmış olan polimerlerden üretilmiş membran kullanılabilir. Bu polimer malzemeler H<sub>2</sub>S ve CO<sub>2</sub>' yi CH<sub>4</sub>'e göre çok daha fazla

geçirmektedir [71]. Biyogazın membran ayırma ile saflaştırılması membranın iç kısmında gazın maruz olduğu itici güç ve o gazın iki taraftaki yüzü arasındaki kısmi basınç farkından yararlanılmaktadır. Bu yöntem çok kullanılan bir yöntem değildir. Yapılan birçok çalışmada membran ayırma ile biyogazın içeriğindeki CH<sub>4</sub> oranı % 94-97 arasında değişiklik göstermiştir [72-73].

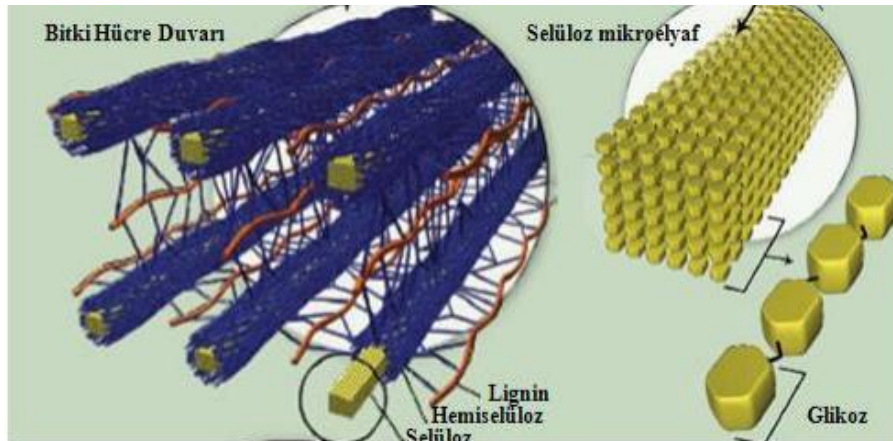
Biyogazın içerisinde H<sub>2</sub>S daima bulunmaktadır. Bu gaz korozyona sebep olmaktadır. Ayrıca kötü kokar ve biyogazın yakılması sırasında SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> gazlarına dönüşür. Bu gazlar oldukça zehirlidir [74]. H<sub>2</sub>S gazı konsantrasyonu 0,0045 ppm' e ulaştığı anda insan tarafından algılanabilir. 0,002 ile 0,2 ppm değerleri arasında ise çürük yumurta kokusu vermektedir. 2 ve 3 ppm arasında çok yoğun çürük yumurta kokusu vermektedir. 5 ppm civarında ise insan sağlığına zarar verici niteliktedir. 10 - 50 ppm arasında ise gözde yaş ve bulantı oluşturmaktadır. 150 - 250 ppm arasında ise duyu sistemleri felç geçirir ve koku hissedilmez. 300 ile 500 ppm arasında solunum sistemi ciddi şekilde zarar görür. 600 ppm' den sonra akciğerler H<sub>2</sub>S ile dolar ve nefes alınamayacak hale gelir. 500 - 1000 ppm arasında merkezi sinir sistemi felç geçirir ve ölüm meydana gelmektedir. 1000 ppm ve üzeri durumlarda doğrudan ani ölüm meydana gelmektedir. Bu gibi durumlar nedeniyle H<sub>2</sub>S gazının adsorplanması gerekmektedir [75]. H<sub>2</sub>S gazı yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> gazı asit yağmurlarına sebep olmaktadır. H<sub>2</sub>S gazının giderimi için yaygın olarak kullanılan biyogazın içine oksijen gazının verilmesi, reaktöre demir klorür katılması, biyogazın demir talaşlardan geçirilmesi, aktif karbon kullanılması, suyun içinden geçirilmesi, sodyum hidroksitten geçirilmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Örnek olarak eğer biyogazın içerisinde 500 ppm H<sub>2</sub>S varsa gerekli oksijen miktarı % 0,025 ve gerekli hava miktarı ise % 0,125' tir. Besleme akımına demir klorür (FeCl<sub>2</sub>) eklenmesi hidrojen sülfür gideriminin de kullanılır. Ayrıca bu malzemenin pahalı olması, klorun korozyona sebep olması, reaktördeki bakterilerin ölme riski, bu tip kullanımlara engel olmaktadır [76]. Bir başka yöntem ise H<sub>2</sub>S gazının bulunduğu gaz karışımını bakır sülfat (CuSO<sub>4</sub>) çözeltisinden geçirilir. H<sub>2</sub>S bakır tarafından tutulur ve siyah bir çökelek oluşmaktadır. Demir hidroksit (FeH<sub>3</sub>O<sub>3</sub>), H<sub>2</sub>S giderimi için kullanılan alternatif bir yöntemdir. Eğer FeH<sub>3</sub>O<sub>3</sub> kullanılırsa rejenerasyon işlemi için sıcak hava gerekir. Fakat sıcak hava ise hidrojen sülfürün yanmasına sebep olmaktadır. Ayrıca biyogaz FeCl<sub>3</sub> ile doymuş talaş içerisinden geçirilmekte ve H<sub>2</sub>S demir sülfür (FeS) şekline dönüşebilmektedir. Başka bir alternatif ise doğal adsorbentler kullanılmasıdır. Bu adsorbentlerin içindeki demir oranı en az % 40 olmalıdır. Bu oranın içinde de en az % 70 aktif demir olmalıdır. Bu süreçlerde en uygun

sıcaklık 15 - 25 °C'dir. Bu yöntem büyük tesislerde çok atık oluşturması ve bu atıkların giderimi zor olması nedeniyle kullanımı kısıtlıdır [77]. Bazı solventler ve zeolit H<sub>2</sub>S arıtımında kullanılır. Zeolit nem alıcı olarak kullanılabilir. Yine biyogaz aktif karbon içerisinden geçirilerek arıtılabilmektedir.

Biyogazın bileşiminde 35 °C'de yaklaşık olarak 35 gr/m<sup>3</sup> su buharı vardır. 20 °C'de ise bu değer yaklaşık 17 g/m<sup>3</sup>'tür [78]. Termofilik bölgelerde ise yaklaşık 50 mg/L su buharı bulunur. Biyogaz yakılması esnasında eğer kırmızı renkli alev çıkıyorsa içindeki su buharından kaynaklanmaktadır. Ayrıca gaz hattında bulunan H<sub>2</sub>S ile reaksiyona girerek H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oluşturur. Bu nedenle donma ya da tıkanmaya sebep olmaktadır. Aynı şekilde CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek karbonik asit (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) oluşturmaktadır. Bu gibi nedenlerden biyogazın içinden nemin giderilmesi gerekmektedir [79]. Nem giderim yöntemleri olarak su adsorptayan maddelerin kullanılması (slikajel vb.) ya da suyun yoğunlaştırılması sağlanmaktadır. Ayrıca metal oksitler üzerine adsorpsiyon, glikol veya suyu seven tuzlarla adsorpsiyon ile nem giderebilmektedir.

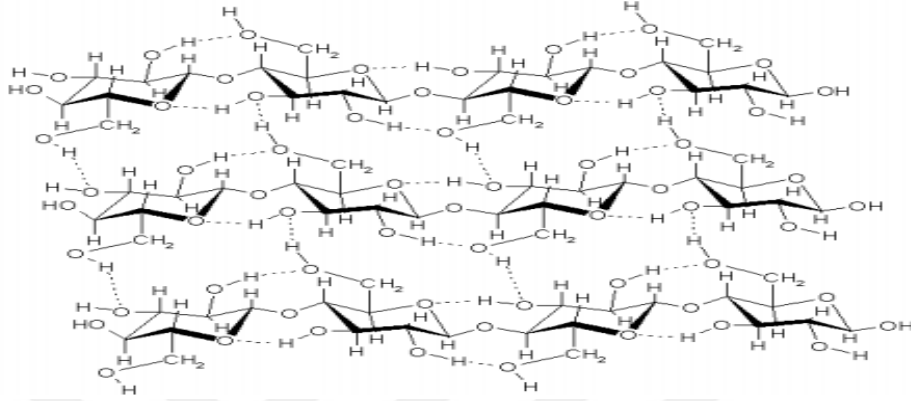
### 3.4. Biyogaz Üretimi için Kullanılan Güncel Ön İşlemler

Genellikle karbonhidrat, yağ ve protein içeren organik bitkisel kaynaklı, kolay hidrolize olmayan lignin, selüloz ve hemiselüloz içermektedir. Hayvansal ve bitkisel atıklarda oldukça fazla bulunan selüloz molekülü binlerce kez glikoz şekerinin bağlanmasından meydana gelir. Selüloz sığır gübresinde minimum % 25 oranında bulunur. Selülozun ise hemiselüloz ve lignin ile oluşturduğu çapraz bağlardan dolayı anaerobik süreçlerde sindirimi oldukça zor olmaktadır. Biyogaz üretimin hidroliz aşamasında enerji bitkilerinin kompleks yapılarından dolayı parçalanması zordur.



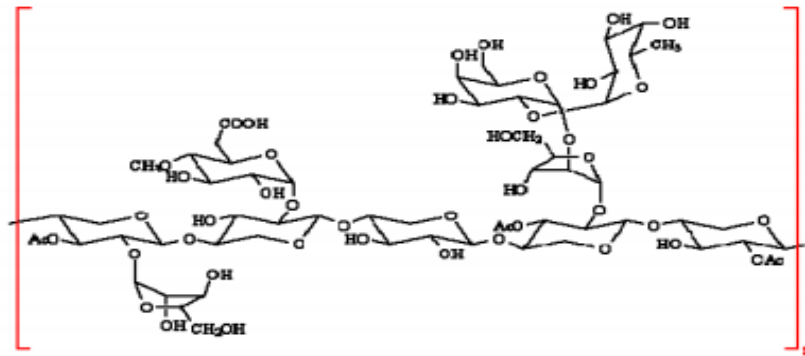
Şekil 3.2 Lignoselülozik bir bileşenin yapısı

Selüloz bitkilerin temel yapı malzemesidir. Yeşil bitkilerin hücre duvarlarını meydana getirir. Bitkiye sertlik ve kalınlık verir. Biyokütlelerin iskelet yapısını oluşturmaktadır. Düz zincirli bir yapıya sahiptir ve binlerce glikoz molekülünün birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır. Kapalı formülü  $(C_6H_{10}O_5)_n$  olarak ifade edilir [80]. Şekil 3.3'te selülozun molekül görüntüsü verilmiştir.



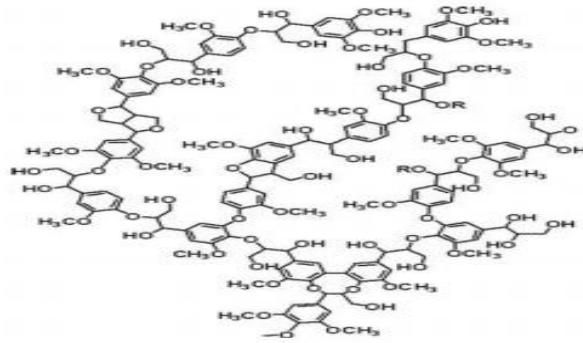
Şekil 3.3 Selülozun molekül yapısı

Hemiselüloz bitkisel biyokütlelerin hücre duvarlarında selüloz ile birlikte yer alır. Zincir yapısı selülozdan daha kısadır ve farklı şekilde şeker yapılarında oluşan dallanmış polimerdir. Hemiselüloz suda çözünmez. Hidrolizi sonucunda sakkarit vermektedir. Hemiselüloz ısıya karşı en hassas yapıdır. 200 - 260 °C' de bozunur. Bu bozunma olayı 2 basamakta gerçekleşmektedir. Bu basamaklar polimerik yapının çözünebilir bileşenler içerisinde bozunması olayıdır. Aynı zamanda monomer birimlerin daha ileri bozunmaya uğrayarak uçucu ürünlere dönüşmesi olarak ta ifade edilebilir. Hemiselülozun genel formülü  $(C_5H_8O_4)_n$ 'dir. Şekil 3.4'te hemiselülozun molekül görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.4 Hemiselülozun molekül yapısı

Lignin polifenoliktir bir makromoleküldür. Diğer polisakkaritlerden farklı olarak üç boyutlu bir polimerdir. Bu yapı sayesinde bağlayıcılık görevi taşımaktadır. Lignini oluşturan monomer maddeler, eter bağlarıyla selüloz ve hemiselüloz ile bağlanarak karmaşık yapıdaki polimerleri oluştururlar. Lignin 280 - 500 °C sıcaklık aralığında bozunmaya uğramaktadır. Bozunma sırasında çar oluşumu, selülozunkine oranla daha fazladır [8]. Şekil 3.5'te ligninin molekül görüntüsü verilmiştir.

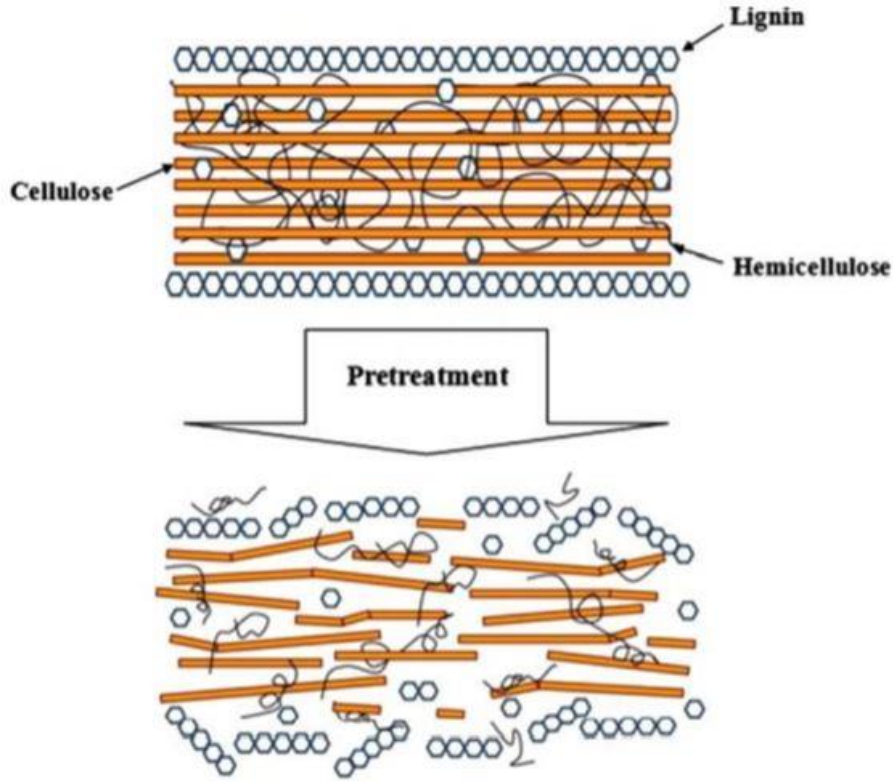


Şekil 3.5 Ligninin molekül yapısı

Lignoselülozik yapısında selüloz, hemiselüloz ve lignin içeren yapıları ifade eder ve bitkisel kökenli biyokütlenin yapısını oluşturmaktadır. Bitkisel kökenli yapılarda selüloz ve hemiselüloz polimer yapıdaki karbonhidratlardır. Aynı zamanda bu yapılar hidrojen ve kovalent bağlarla sıkıca lignine bağlanması sonucunda lignoselülozik yapılar ortaya çıkmaktadır. Biyokütlenlerin yapısında farklı oranlarda selüloz (% 40 - 60), lignin (% 10-25) ve hemiselüloz (% 20 - 40) içermektedir [81, 82]. Lignoselülozik biyoküteller dünyada en çok bulunan biyokütledendir. Lignoselülozik bir biyokütleden biyogaz üretimi oldukça zordur. Bu nedenle fosil yakıtlarının kullanımının azalması ve yeni enerji kaynaklarına yönelme olması gerektiğinden lignoselülozik biyokütellerin biyogaz üretiminde değerlendirilmesi gerekmektedir [83].

Büyük molekül yapıları organik maddeler metanojenlerin olduğu ortamda biyolojik olarak parçalanamaz ve hidroliz oldukça uzun sürmektedir. Bu duruma göre üretim verimini etkileyen en önemli bileşen biyoreaktördeki hammaddenin içeriğinde bulunan katı madde derişimi ve kimyasal yapısıdır. Bazı çalışmalarda giren akımın % 6 ila % 12 arasında katı madde oranına sahip olması gerektiği savunulmuştur [84]. Anaerobik sistemlerde ön işlemin yapılmasının amacının bir nedeni de organik maddenin suda çözünmüş forma dönüştürülerek reaktöre beslenme işlemidir. Son yıllarda bu amaca yönelik oldukça fazla

ön işlem oluşturulmuştur. Bu nedenle organik maddeler fiziksel, kimyasal, biyolojik ve termokimyasal ön işlemler uygulanarak suda çözülmüş forma dönüştürülmesi gibi çalışmalar yapılarak verim artırılmıştır. Şekil 3.6'da lignoselülozik moleküle ön işlem uygulanması sonucu şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.6 Ön işlem uygulanan lignoselülozik bir bileşenin yapısı

### 3.4.1. Fiziksel ön işlemler

Fiziksel ön işlemler; öğütme, gama ışını ya da mikrodalga ışınının uygulaması, yüksek basınçlı buhar uygulaması, genişleme ve piroliz ön işlemlerini kapsamaktadır. Fiziksel ön işlemler sayesinde organik maddenin yüzey alanı ve gözenek sayısı artmaktadır. Aynı zamanda selülozun polimerleşme ve kristalleşme derecesi azalmaktadır. Bitkisel organik maddelere uygulanan en önemli ön işlem parçacık boyutunun küçültülmesidir. Biyogaz üretiminde parçacık boyutlarının üretimi artırdığı rapor edilmiştir. Fakat diğer ön işlemlerle birlikte uygulandığında ise daha fazla üretimin olduğu belirlenmiştir. Lignoselülozik organik maddeye ışın uygulanması daha çok etanol üretiminde hidroliz aşamasını hızlandırmak adına yapılmıştır. Küspe ile yapılan çalışmalarda ışın

uygulanmasında küspenin veriminin iki kat arttığı belirlenmiştir. Işın ön işlemi verimli olmasına karşın endüstriyel alanlarda uygulanması maliyetli olması açısından tercih edilmemektedir.

Ultrasonik ses dalgası ise diğer bir fiziksel ön işlemdir. Ultrasonik ses dalgasının yoğunluğu ve şiddeti parçalanmayı etkileyen bileşenlerdir. Ayrıca fiziksel ön işlem ile organik maddeler sıcak suyla pişirilir. Yüksek basınçta gönderilen su organik madde ile temas ederek selülozun suda çözünmesini etkilemektedir. Aynı zamanda hem hemiselülozun hem de ligninin ayrışmasını sağlamaktadır.

### **3.4.2. Kimyasal ve fizikokimyasal ön işlemler**

Kimyasal ve fiziksel ön işlemlerin birlikte kullanılması ile uygulanan ön işleme fizikokimyasal ön işlem denilmiştir. Sıcak buhar uygulaması yenilikçi bir ön işlem uygulaması olarak kabul edilmiştir. Buhar ligninin ayrışmasını sağlamaktadır. Sıcak buhar uygulaması yüksek basınç ve yüksek sıcaklarda (150 - 250 °C) arasında gerçekleştirilir. Bu özellikteki buhar organik maddenin hücre duvarının tamamen değiştirmektedir. Aynı zamanda hemiselülozun suda çözünmesinde etkilidir. Kullanılan ısı ön işlemin NaOH gibi kimyasal bir bazla kombine edildiğinde ısı ve kimyasal ön işlemin ayrı kullanımından daha fazla verim verdiği tespit edilmiştir. Buhar ile uygulanan ön işlem SO<sub>2</sub> ile kombine edildiğinde selüloz ve hemiselüloz parçalanmaktadır. Eklenen SO<sub>2</sub>'nin % 1 - 4 arasında bir değer olması gerektiği ve 10 dakikalık artan sıcaklık periyotlarında gerçekleşmesi gerektiği savunulmuştur. Süperkritik akışkan CO<sub>2</sub> kullanılması, ekstraksiyon solventi olarak düşünülmüştür. Sert odunlarda etkili bir ön işlem olarak kabul edilmiştir. Yüksek basınçta CO<sub>2</sub> kullanılması lignini parçalamaktadır. Fakat endüstriyel uygulamalar için CO<sub>2</sub>'nin pahalı olduğu bilinmektedir.

Kimyasal ön işlemler maliyetli olmasına karşın son yıllarda yenilenebilir enerjilere olan talep yoğunluğu nedeniyle oldukça çekici bir hale gelmiştir. Bu ön işlemler fiziksel ön işlemlerle aynı etkiyi yapabilme yeteneğine sahiptir. Alkalin ilavesi selüloz ve hemiselüloz arasındaki yapısal bağları kırmaktadır. Fiber yapısını ve gözenek yapısını arttırmaktadır. Bu sayede suda çözünmeyi hızlandırmaktadır. Asit eklenmesi ise lignoselülozik organik bileşeni parçalamak amacıyla kullanılmaktadır. En çok kullanılan asitler H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> ve HCl olarak bilinmektedir. Bu uygulamalarda düşük sıcaklıkta kuvvetli asitler etkili olmaktadır. Asit ön işlemleri ya yüksek sıcaklık zayıf asit ya da düşük sıcaklık kuvvetli asit olarak kabul edilmiştir.



### 3.4.3. Biyolojik ön işlemler

Anaerobik fermantasyonda bakteriler ve mikrobiyolojik enzimler tarafından gerçekleştirilen ön işleme biyolojik ön işlemler denilmektedir. Bu ön işlem teknolojisi kullanım kolaylığı ve yatırım maliyetinin az olması gibi nedenlerden dolayı avantajlıdır. Lignoselülozik bileşenlerde bulunan lignin mantar ve bakteriler sayesinde anaerobik sindirime uğrayabilirler.

Mantarlardan kahverengi mantarlar, yumuşak mantarlar ve beyaz mantarlar gibi bazı mantarlar biyolojik ön işleme uygundur. Beyaz mantarlar polimerik yapıda bulunan hidrokarbonların yıkımında etkilidir. Biyolojik ön işlemler ligninin gideriminde kullanılmasının yanında antimikrobiyal maddelerin oluşumunu önlemektedir.

Çizelge 3.6'da biyogaz üretim sistemlerinde kullanılan güncel ön işlemler ve etkileri özetlenmiştir.

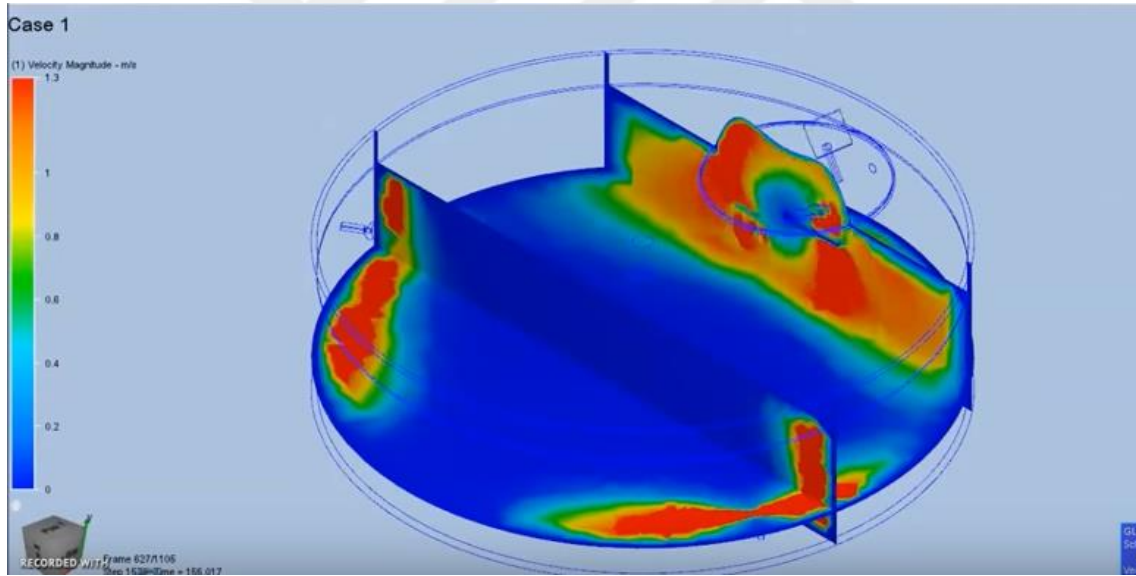
**Çizelge 3.6** Biyogaz üretiminde kullanılan güncel ön işlemler

Ön işlemler	Etkisi	Fonksiyonu	Ekonomik Zorluğu	Referans
Fiziksel ön işlemler	Ultrasonik, öğütme ve piroliz.	Gözenek sayısını artırır, kristaliteyi azaltır	Yüksek elektrik enerji maliyeti vardır.	[85,86,87]
Termal ön işlemler	Sıcaklık etkisi (0-120 °C' ye maruz bırakma).	Selülozun parçalanması, hemiselüloz ve ligninin yüksek giderimi.	Enerji maliyeti nispeten fazladır.	[88,89]
Asidik ön işlemler	Genellikle H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> , HCl ve H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ' tür	Hemiselüloz hidrolizinin artırılması	Asitin geri kazanılması ya da asititenin sonradan ayarlanması zordur.	[89,90]
Alkali ön işlemler	NaOH, KOH, NH <sub>3</sub> ve kireç.	Moleküllerin iç yüzey alanını artırır, polimerizasyon aşamasını azaltır ve kristalizasyonu azaltır.	Baz çözeltilerinin yüksek maliyeti vardır.	[85,89]
Çözücü (solvent) ön işlemler	CH <sub>3</sub> OH, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> , hidrofurfuril alkoller gibi organik çözücüler.	Ligninin çözünmesi sağlar.	Çözücü maliyeti yüksek ve çözücünün yeniden kazanılması maliyetlidir	[89,90]
Süzme (çözeltiden geçirmek)	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> , (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> O, CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> , ya da C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> gibi çözücüler	Turunçgillerin yapısındaki anaerobik süreçlerde inhibitör maddelerin giderilmesini sağlamak.	Çözeltilerin maliyeti yüksektir.	[91,92]
Süperkritik sıvı ön işlemler	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O ve NH <sub>3</sub> 'e maruz bırakma.	Ligninin giderilmesi ve biyokütlenin anaerobik süreçlerde giderilmesini sağlar.	Süperkritik akışkan maliyeti yüksektir.	[93]
Oksidatif (yükseltgen) ön işlemler	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ve C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> gibi yükseltgen bileşiklerle muamele etme.	Lignin ve hemiselülozun giderimi, selülozun kolay sindirimini sağlar.	Kimyasalların maliyeti yüksektir.	[88]
Biyolojik ön işlemler	Bazı mantar cinsleri (beyaz çürükçül mantar ve kahverengi çürük mantar vb.) ve mikrobiyal enzim ürünleri)	Selüloz, hemiselülozun ve ligninin parçalanmasını sağlamak.	Enzimlerin maliyeti yüksektir.	[90-93, 95-96]
Termokimyasal ön işlemler	Yüksek sıcaklıklarda alkali ya da asidik ön işlemlere maruz bırakma adına yapılan bir ön işlemdir.	Selüloz, lignin ve hemiselülozun parçalanmasını sağlar.	Sıcaklık maliyeti yüksektir.	[97]

### 3.5. Biyogaz Üretimi için Kullanılan Genel Program ve Modeller

#### 3.5.1. CFD (Computational fluid dynamics)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ya da İngilizce adıyla computational fluid dynamics (CFD) yazılımları ilk olarak 1960' lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, CFD yazılımları, tasarım sürecinin kısaltılması ve üretim maliyetinin azaltılması bakımından yoğun şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, tasarım sonrası imal edilen prototipler üzerinde, çok sayıda deney yapılması ve yine çok sayıda güvenlik önlemleri alınması, özellikle büyük sistemlerde çok zor ve maliyetli bir işlemdir. Önerilen proje kısmıyla ilgili olarak CFD analizi tanımlanacak olursa; akış ve ısı transferi açısından problemin analitik olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu nedenle, reaktör içindeki akış davranışı ve ısı transferi incelenirken hazır CFD paket programı kullanılması maliyeti düşürmektedir [98]. Şekil 3.7'de biyogaz reaktörünün karıştırıcı etkisinin t anındaki görüntüsü CFD programından alınmıştır.



**Şekil 3.7** CFD programının biyogaz reaktörü içerisinde karıştırıcı etkisinin görsel olarak tanımlanması

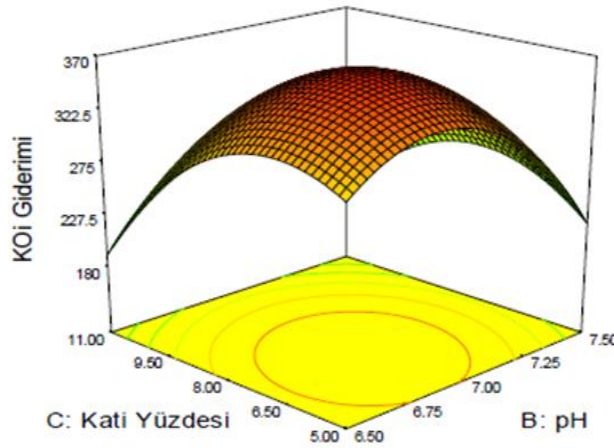
Şekil 3.7'de bir çalışmada bulunan biyoreaktörün içerisine yerleştirilmiş karıştırıcının reaktör içindeki akış davranışına etkisi simüle edilmiştir. Hız dağılımı incelendiğinde, biyoreaktörün orta kısımlarında akışkan hızının düşük olduğu (karıştırıcı etkisinin az olduğu), karıştırıcı çarklarına yaklaşan kısımda ise akışkan hızının arttığı (karıştırıcının en etkili olduğu kısım) görülmektedir. Bu nedenle özellikle büyük tesisli kapasitelerde karıştırıcı çarklarının ayarlanmasında veya aynı şekilde optimum ısıtıcının ve ısı

kayıplarının da buna benzer şekilde incelenmesi reaktör için optimum verimlilik ve minimum maliyet sağlamaktadır [99].

### 3.5.2. RSM (Response surface methodology)

RSM, Türkçe adıyla yanıt yüzey yöntemi, birçok süreçler de işletim verimi ve ürün optimizasyonu için kullanılan istatistiksel bir programdır. Bu program süreci etkileyen parametreler bağımsız değişkenler ve sonuçları etkileyen parametreler de bağımlı değişkenler olarak bilinmektedir. Bu program hakkındaki en önemli olan optimum bölge ise; yanıtların (sonuçların) izohips eğrilerinin çizilerek üst üste yerleştirilmesi olayı (superimposing) veya lineer olmayan programlama yaklaşımları kullanılarak belirlenir [100].

Bu program için öncelikle bağımlı ve bağımsız değişkenler belirlenir. Bağımlı değişkenler 'metan üretimi' olarak belirlenir. Bağımsız değişkenler ise pH, % kuru madde, KOİ giderimi, C/N oranı, ön işlem etkisi (kj ve dakika değerleri) olarak belirlenip birtakım RSM formülasyonlar sonucunda (en küçük kareler yöntemi ile) 3 boyutlu grafiklerin çizilmesi sağlanır. Daha önceki çalışmalarda RSM uygulamalarının optimizasyon açısından ve maliyet açısından kullanılmasında avantajlı olduğu belirtilmiştir [100].



Şekil 3.8 pH ve kati yüzdesi bağımsız değişkenleri kullanarak oluşturulan RSM grafiği

Şekil 3.8'de taze tavuk gübresinin (en küçük kareler yöntemi uygulanarak) yapılmış olan RSM' nin 3 boyutlu grafiği gösterilmektedir. Kuru madde oranı % 5' ten % 11' e kadar alınmıştır. Aynı zamanda her gün pH ölçümleri yapılmıştır. Çeşitli analizler ve KOİ

analizleri ve deneyleri sonucunda bağımlı ve bağımsız değişkenleri kullanarak bu grafik elde edilmiştir. Bu grafiği yorumlamak hem görsel açıdan hem de bir bütünlük açısından çok daha kolay ve avantajlıdır [100].

### 3.5.3. ADM1 (IWA anaerobic digestion model no.1 )

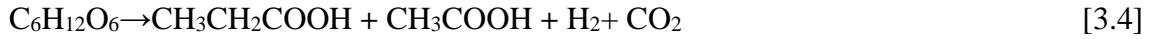
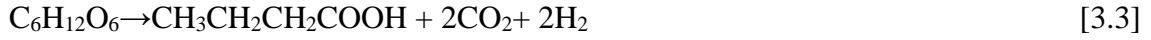
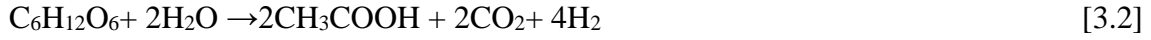
Biyogaz üretiminde düşük miktarlarda CH<sub>4</sub> üretimi ve yüksek konsantrasyonlarda UYA'ların üretimi yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Laboratuvarlarda harcanan fazla zaman ve yüksek maliyet göz önüne alınarak, anaerobik çürütücülerin dinamik davranışlarının araştırılması bu denli problemlerden kaçınılması, verimli bir üretim prosesine matematiksel model geliştirilmiştir. Anaerobik sindirim için simülasyonu geliştirilen en son model ADM1 modelidir. Bu model biyokimyasal ya da fizikokimyasal süreçleri tanımlayan birçok adımı içermektedir [101]. Bu modelin kullanılmasının amaçları şu şekilde ifade edilebilir:

- Optimizasyonu artırmak.
- Tam otomasyonlu sistemlerde prosesin optimizasyonu ve kontrol çalışmalarını sağlamak.
- Yeni modeller geliştirilmesine temel oluşturulmak.
- Bilimsel araştırmaların endüstriyel kullanıma geçişe yardımcı olmak.

ADM1 model organik maddelerin anaerobik parçalanma sırasında CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve inert yan ürüne (organik gübreye) dönüşümünü kapsayan prosesi ifade etmek için yapılandırılmış bir matematiksel modeldir. Model yapısı saf ve karmaşık kültürlerin sürekli ya da kesikli sistemler için performansının tanımlanmasında önemli ölçüde uygun modifikasyonlar ile esneklik sunmaktadır. ADM1 modelin basit ve modifiyeli hali simülasyonları için bir platform basamağı niteliğindedir. Anaerobik fermantasyonda hidroliz ve metan oluşumu gibi basamaklar modifiye olmuş halinden çıkarılmıştır [102].

ADM1 organik atıkların karışık kültür fermantasyonu ile oluşan metan üretim proseslerinde başarılı şekilde kullanılmıştır. Metan oluşumunun son adımı hariç tutularak H<sub>2</sub> ve UYA oluşumunu tahmin etmek için ADM1 yapısı modifiye edilmiştir. Bu modelde şeker substratı (S<sub>1</sub>) kullanılıp son ürün olarak bütirat (S<sub>2</sub>), propiyonat (S<sub>3</sub>), asetat (S<sub>4</sub>), hidrojen (S<sub>5</sub>) ve biyokütlenin (X<sub>1</sub>) olduğu bir proseste ADM1 modeli baz alınır

geliştirilen modifiye olmuş modelde eşitlik (3.2) , (3.3) ve (3.4) verilen reaksiyonlar ara adımları tanımlamak için kullanılmıştır [103].



#### 3.5.4. Gompertz denklemi

Büyüme modelleri, popülasyonların bilinmeyen bazı değerlerini tahmin etmek için kullanılır. Matematiksel modeller; sigmoidal modeller ve mekanik modeller olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Sigmoidal modeller, doğrudan sistem hakkında bir fikir vermezler ve a, b, c vb. gibi parametreleri içerir. Bu modellerde, parametreler doğrudan anlam ifade etmez. Ancak, mekanik modeller biyolojik anlamlı A,  $\mu_m$  ,  $\lambda$  vb. parametreler içerirler.

Sigmoidal modeller, sadece veri kümesinin genel şeklini tarif ederken, mekanik modeller gerçek sistem özelliklerinin (büyüme oranı, en büyük boyutu, öteleme süresi, başlangıç boyutu vb.) tahmini hakkında bilgi verirler.

Gomperz kinetik modeli besin endüstrisinde kristalleşme üzerine yapılan kinetik çalışmalarda kristal kısmının tespiti için yapılmış sigmoidal eğri gösteren bir kinetik model çeşididir. Şekil 3.9'da örnek gompertz denkleminin grafiği verilmiştir.

$$M = P \cdot \exp \left\{ - \exp \left[ R x \frac{e}{P} (\lambda - 1) + 1 \right] \right\} \quad [3.5]$$

Burada;

M: eklenik spesifik metan üretimini (ml CH<sub>4</sub>/ g UAKM),

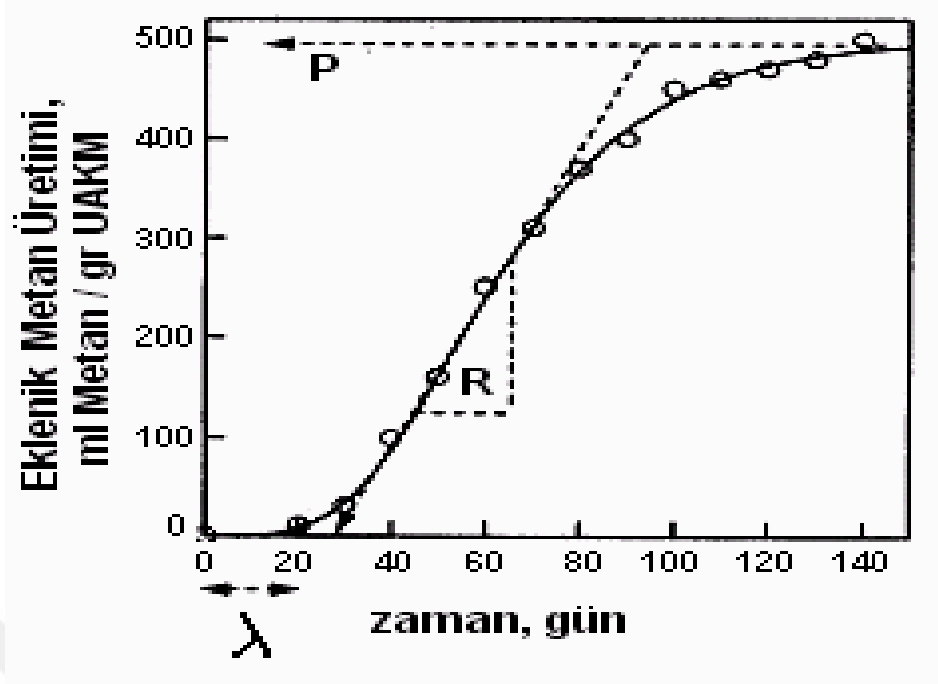
E=exp(1),

R: maksimum metan üretim hızını (ml CH<sub>4</sub>/gr UAKM.gün),

P: metan üretim potansiyelini, (ml CH<sub>4</sub>/gr UAKM),

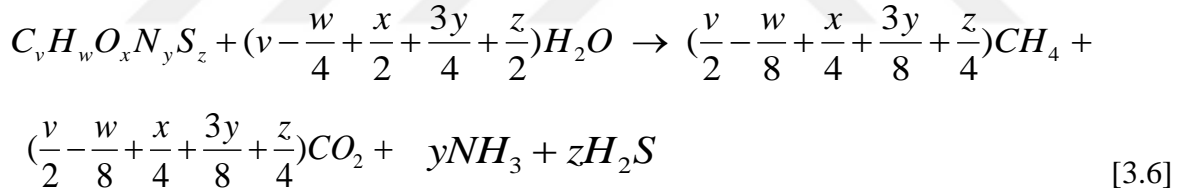
$\lambda$ : gecikme fazı süresini (gün) göstermektedir.

Bu denklemi açıklayan grafik eklenik metan üretim eğrisinin şematik gösterimi Şekil 3.10'da verildiği gibidir [104].



Şekil 3.9 Eklenik metan üretimi eğrisinin şematik gösterimi

### 3.5.5. Bushwell denklemi



$$f_{CO_2} = \frac{4v - w + 2x - 5y + 2z}{8(v - y + z)}$$

$$f_{CH_4} = \frac{4v + w - 2x - 5y - 2z}{8(v - y + z)} \quad f_{H_2S} = \frac{z}{8(v - y + z)}$$

Bushwell denklemi ile teorik  $CH_4$ ,  $H_2S$  ve  $CO_2$  miktarları hesaplanabilmektedir. Elementel analiz cihazında C, N, O, S ve H değerleri gram cinsinden belirlenir. Ardından bu değerler bileşenlerin molekül ağırlıklarına bölünerek w, v, x, z ve y değerleri hesaplanabilmektedir. Bulunan bu değerler bushwell denkleminde yerine koyularak teorik metan verimi, teorik karbondioksit verimi, teorik hidrojen sülfür verimi ve teorik amonyak üretimini ortaya koyabilmektedir [105].

### 3.6. Biyogazın Kullanım Alanları

Biyogazın ısıl değeri içerisindeki  $CH_4$  bileşenine bağlı olarak 20-27 MJ/m<sup>3</sup> olarak değişmektedir. Enerji değeri yüksek olan biyogazdan doğrudan yakılarak enerji elde edilmektedir. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir ve doğrudan mekanik iş ya da elektrik üretilebilir. Absorpsiyonlu ısıtma ve soğutmalarda kullanılmaktadır. Kırsal kesimlerde doğrudan yakılarak aydınlatma olarak kullanılmaktadır.

Biyogazın LPG ile çalışan cihazlarda kullanılabilmesi için bir takım değişiklikler gereklidir. Hava girişi ve yanma hızının ayarlanması bu değişikliklerden biridir. Meme çapı doğal gazla çalışan cihazlara göre % 30 daha büyük olmalıdır. Biyogazın yanması için litre başına 5,1 litre hava gereklidir. Biyogaz genellikle düşük yanma hızında kullanılmaktadır. Uygun yanma hızı ortalama 0,30 m/s değerindedir. Biyogazı doğrudan kullanan yakma ünitelerinde  $H_2S$  derişimi 100 ppm'e kadar kabul edilebilmektedir. Petrol ürünlerinde kullanılan bütün motorlarda biyogaz kullanılabilir. Örneğin dizel motorlarda % 30 motorin ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte biyogaz sabit veya hareketli tarım makinalarında kullanılabilir. Biyogazın içerisinde  $CO_2$  bulunması nedeniyle yakma verimi düşer fakat  $NO_x$  emisyonu azalmaktadır.

Biyogazın araçlarda kullanımını İsveç'te araştırılmış ve motorlu taşıtlar yakıtlarına alternatif bir yakıt olabileceği ortaya konulmuştur. Fakat biyogazın bu gibi durumlarda kullanımının da artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Bunun nedenleri arasında  $H_2S$ 'nin yüksek korozif etkilerinden kaçınılması ve biyogazın içerisinde bulunan su buharının buzlanma ile oluşabilecek etkilerinden kaçınılmasıdır.

1 m<sup>3</sup> biyogaz 60 W gücündeki 25 tane ampulü 1 saat çalıştırabilme yeteneğine sahiptir. Biyogaz jeneratör ile elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Biyogaz yakıt hücrelerinde  $H_2$  gazına dönüştürülerek kullanılabilir. Yakıt hücrelerinin elektrik çevrim verimi ortalama % 50'dir. Elde edilen  $H_2$  gazı ve  $CO$  gazı Fischer - Trops sentezi prosesi ile sıvı hidrokarbonlara çevrilebilmektedir. Örneğin metanol bunlardan biridir. Dizel yakıtın yerini alabilen dimetil eter de bu yakıtlardan diğeridir [9].

### 3.7. Biyogaz Üretiminde Yan Ürün Olarak Fermente Gübre

Anaerobik fermantasyonda yan ürün organik gübre olarak adlandırılır. Reaktöre beslenen materyalin içindeki C, O ve H anaerobik fermantasyon sırasında  $CH_4$  ve  $CO_2$  formunda çıkar ve geriye diğer besin ve elementler korunur. Hammaddenin mineral yapısı önemli



derecede değişikliğe uğramaz. Taze organik atıkta bitkilerin kolaylıkla kullanabileceği formda fosfor (F), potasyum (K) ve azot bulunur. Anaerobik fermantasyon sırasında aminoasitler ve proteinler amonyak ve çözünmüş amonyum şekline dönüşürler. Azot başlıca amonyum formundadır. Anaerobik fermantasyon sürecinde gaz halinde bulunan azot başlıca  $NH_3$  e dönüşür. Bu süreçte yarı yarıya organik ve mineral azot elde edilmiş olmaktadır. Mineral azotu bitkiler doğrudan kullanabilmektedir. Ayrıca ölen bakteriler anaerobik gübrenin organik kısmını zenginleştirir.

Fermente gübre içindeki mineral madde içeriği kullanılan hammaddeye göre değişiklik göstermektedir. Örneğin sadece hayvan atıkları kullanıldığında P içeriği K ve N içeriğine göre daha azdır. Anaerobik fermantasyondan önce C/N oranının düşürülmesi daha değerli bir fermente gübrenin olmasını sağlar. Tarımsal uygulamalarda C/N oranının en uygun değeri 13'tür. Fermente gübre N, K ve P yanında ayrıca Ca, Mg, S, Cu ve Zn bulundurur. Fermente gübrenin kokusu daha az olmaktadır. Zararlı ot tohumları işlevini yitirmektedir. Fermente gübrede P/K oranı yaklaşık olarak 1/3'tür. Bu oran buğday benzeri bitkilerin gelişimi için uygundur. Fermente gübre K, P ve N açısından zengin olduğu için kompost gübreye göre daha değerlidir. Yapılan çalışmalar sonucunda azot açısından fermente gübrenin kompost gübreye göre yaklaşık 3 kat daha zengin olduğu belirtilmiştir. Fermente gübre reaktörden çıkar çıkmaz kullanılması içinde bulunan  $H_2S$  miktarının çözünmüş olması nedeniyle problem yaratmaktadır. Fakat fermente gübre 15-30 gün açık havada bekletilip kullanılabilir. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre kimyasal gübrenin etkisi 1 yıla kadar sürerken fermente gübrenin etkisi 3 yıla kadar sürmektedir. Fermente gübre atmosfere açık şekilde kurutulursa toplam azotun yarısını, inorganik azotun ise yaklaşık % 90'ını kaybetmektedir. Fermente atık bir ayırıcı ile katı ve sıvı olarak kullanılmaktadır. Sıvı gübre inorganik gübre yerine doğrudan kullanılmaktadır. Katı gübre ise toprak şartlarında torf yerine kullanılmaktadır. Anaerobik reaktörde kütle denkleği dikkate alınırsa giren akımın yaklaşık % 2-4'ü biyogaza dönüşür ve geriye kalan kısmı fermente gübredir. Bu geriye kalan kısmın yaklaşık % 25'i katı ve % 75'i sıvıdır.

#### 4. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Dhamodharan vd., (2015) besin maddesi atıklarının anaerobik şartlarda çürümesi için bazı çiftlik hayvan gübrelere anaerobik aşı etkisini incelemiştir. Beş farklı hayvan gübresi, kümes hayvanı gübresi, keçi gübresi, sığır gübresi, domuz gübresi ve gergedan gübresi aşı maddesi olarak kullanılmış ve bunların etkisi kesikli reaktörde çeşitli besin maddesi atıklarının oranları ile değerlendirilmiştir. Farklı hayvan gübrelere aşı olarak kullanılması daha çok metan oluşumunu ve uçucu katı giderimi sağlamıştır. Mikroorganizma/besin oranları kümes hayvanı gübresi, keçi gübresi, sığır gübresi, domuz gübresi ve gergedan gübresinin sırasıyla 1,5, 2, 2, 1,5 ve 1,5 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar sığır gübresi ve domuz gübresi aşı maddelerinin besin atıklarına anaerobik sindirim için daha uyumlu ve verimli olduğunu kanıtlamıştır. Sığır gübresi aşılanan reaktörler daha yüksek bir metan üretimi aşı maddesi oranı 2:1 için (227 ml/g UK) ve uçucu katı giderimi % 54,58 olarak ölçülmüştür [106].

Forster vd., (2006) kentsel katı atıkların organik kısımlarının ayrılarak termofilik şartlarda anaerobik çürümesinin aşı kaynağı üzerindeki etkisini incelemiştir. 1,1 litre reaktör hacimli laboratuvar ölçekli reaktör performansını ölçmek için; mısır silajı (1), pirinç kabuklarının restoranda ki atıklarla karışımı (2), ham sığır gübresi (3), domuz gübresi (4), lağım çamuru (5), lağım çamuru ile karışık domuz gübresi (6), 1:1 oranında karıştırılarak 6 farklı aşı maddesi hazırlanmıştır. Aşı maddesi etkisinin inceleneceği organik atıklar üniversitenin restoranlarından toplanarak ayıklanmıştır. Seçici koşullar olarak; % 25 aşı, % 30 toplam katı ve sıcaklık 55 °C seçilmiştir. Çalışmada altı farklı aşı kaynağının ilk olarak 2-4 gün beklenmesi gerektiği ve ilk metan oluşumu 10. günü aşkın süre sonra olmaya başladığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar lağım çamurunun en iyi aşı maddesi olduğunu göstermiştir. 60 günü aşkın süre sonunda lağım çamurunun kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) % 44 'e kadar toplam uçucu katıda % 43 'e kadar giderimi sağlandığı gözlemlenmiştir. Denge durumunda lağım atıkları kullanılan reaktörde: hacimsel olarak daha yüksek metan oluştuğu (78,9 ml/gün ve 0,53 l CH<sub>4</sub>/gUK) gözlemlenmiştir. Ayrıca domuz gübresi/lağım çamuru karışımı bu deneysel koşullarında çok iyi bir aşı kaynağı olduğu sonucuna varılmıştır [107].

Lopes vd., (2004) kentsel katı atıkların organik kısımları anaerobik çürüme sürecinde sıvı bir aşı olan hayvan işkembe sıvısının etkisi araştırmışlardır. Değerlendirmede; toplam uçucu katı madde ve kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi dikkate alınmıştır. Deneyler kesikli

reaktör olmak üzere; reaktör A (% 100 - % 0) , reaktör B ( % 95 - % 5), reaktör C (% 90 - % 10) ve reaktör D (% 85 - % 15) kentsel katı atık/aşı maddesi içeriği karışımı olarak sabitlenerek 4 farklı reaktörde sistem kurulmuştur. A,B,C,D reaktörleri için sırasıyla gerekli süre 459, 347, 302, 234 gün olarak belirlenmiştir. Üretilen metan konsantrasyonları da sırasıyla reaktör A, B, C ve D için sırasıyla % 3,6, % 13,0 , % 25 , % 42, 6 olarak bulunmuştur. Elde edilen veriler aşı maddesi bulunan reaktörler için prosesin performansını önemli ölçüde artırdığını bu çalışma ile doğrulanmıştır [108].

Narra vd., (2016) pirinç sapından biyometan oluşumunun incelenmesi toplam katı madde içeriği, açık hava pilot çürütücü tesisinde en yüksek katı madde içeriği % 25 olacak şekilde kesikli reaktörde yürütmüşlerdir. Pirinç sapı için sırasıyla 21. gün ve 35. günler arasında her birinin mezofilik ve termofilik şartlar altında, nikel ve kobalt, sırasıyla 10 ve 15 mg/kg eklenmesiyle 6 ay boyunca izlenmiştir. Mezofilik ve termofilik çürütücülerdeki ortalama biyogaz verimi sırasıyla 310 l/kg TK ve 396 l/kg TK olarak bulunmuştur. Çürütücü kontrolü için uyum ilişkisi 225 l/kg TK ve 270 l/kgTK bulunmuştur. Mezofilik ve termofilik şartlarda mikrobeyicilerin eklenmesiyle % 37 ve % 48 arasında daha fazla biyogaz oluştuğu gözlemlenmiştir. Biyogazdaki metan üretimi % 57 - 59 olarak ölçülmüştür. Anaerobik olarak çürütülmüş organik gübredeki nitrojen, fosfor ve potasyum içerikleri sırasıyla % 1 - 1,2, % 1,3 - 2,2, % 1,2 - 2,1 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgularda; bu prosesin daha hızlı olduğu, % 85 daha az su içerdiğini ve yeşil enerji üretimine ek olarak geleneksel metotlarla karşılaştırıldığında daha kısa sürede organik gübre elde edildiğini görülmüştür [109].

Maamri vd., (2014) aktif çamur atığının oksijensiz ortamda anaerobik sindirimi termofilik şartlarda çalışılmışlardır. Sığır gübresinin aktif çamur atığı ile kullanılmasındaki toplam katı madde konsantrasyonları; 12,02, 17,58, 23,28, 26,75, 35,2 g/L TK derişimlerle 15 gün alıkonma süresince termofilik şartlarda kesikli reaktörlerde anaerobik olarak çürütülmüştür. Toplam katı madde içeriğinin artmasıyla birlikte biyogaz oluşum potansiyelinin ve oluşumunun da arttığı gözlemlenmiştir. Toplam katı konsantrasyonları sırasıyla 12,02, 17,58, 23,28, 26,75, 35,2 g/L değerlerinin maksimum biyogaz verimi sırasıyla: 0,186, 0,189, 0,93, 0,213 ve 0,231 l/g UK olarak ölçülmüştür. Modifiye gompertz eşitliği; farklı substrat oranlarında biyogaz üretim modeli için kullanılmıştır. Bu denklem maksimum biyogaz verimi ve biyogaz oluşum potansiyelini  $R^2 = 0,996$  katsayı ilişkisiyle olumlu bir şekilde vermiştir. Toplam katı madde konsantrasyonunun olduğu optimum değer 35,8 g/L belirlenmiştir. Maksimum biyogaz oluşumuna 0,856 L/gün ve biyogaz verimi

deneylerin 13. gün sonunda belirmeye başlamış 6,65 litre elde edilmiştir. Oluşan bu biyogazın içeriği % 72,59 metan , % 23,60 karbondioksittir. Bu değerler 190 kWh elektrik enerjisi gücüne eşittir. Bu sonuçlar aktif çamur atığı ile ilgili sığır gübresi karışımının ham madde olarak etkili bir besleme olduğunu ve giderek artan verimli birbiyogaz veriminin sağladığını ispatlamıştır [110].

Günel vd., (2015) büyükbaş hayvan midesinde alınan rumen sıvısının aşısı olarak kullanıldığı büyükbaş hayvan dışkısı ile işletilen anaerobik çürütücülerde, farklı oranlarda kullanılan aşının hidroliz ve asidifikasyon verimlerine olan etkinin incelemiştir. Uçucu yağ asidi (UYA) üretiminin en yüksek olduğu optimum karıştırma oranının tespit edilmesi amacıyla, rumen sıvısı ile büyükbaş hayvan dışkısı farklı karıştırma oranlarında (% 0, % 10, % 20, % 30, % 40, % 50, % 100) 100 mL'lik serum şişelerinde 4 tekrarlı olarak hazırlanmış ve 40 °C'de inkübe edilmiştir. Bununla birlikte, günlük olarak gaz ölçümleri manometre ile yapılmış, her 10 günde bir paralel şişelerden biri açılarak numune alınmış ve pH, toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), toplam keldahl azotu (TKN) ve uçucu yağ asidi miktarları tayin edilmiştir. Bu çalışmada en yüksek asidifikasyon verimi % 40 rumen sıvısı içeren deney setinde (R<sub>5</sub>, % 40) elde edilmiştir. Deney setlerinde TUKM/TKM oranları % 80-85 arasında değişirken, sadece rumen ile işletilen R<sub>7</sub> (% 100) setinde bu oran % 50 mertebesinde kalmıştır. En yüksek UYA üretimi 6700 mg asetik asit/lile deney seti (R<sub>5</sub>, % 40)' da elde edilmiştir. Rumen sıvısının aşısı çamuru olarak kullanıldığı anaerobik sistemlerde, rumen sıvısının asidifikasyon verimi üzerine olumlu yönde etkisi olduğu görülmüştür [111].

Ojolo vd., (2007) mutfak atıkları ve sığır gübrelere biyogaz üretmeyi denemiştir. Deneylere aşısı olarak kümes hayvanları gübresinden de farklı oranlarda eklemiştir. Kümes hayvanları sığır gübresi ve mutfak atıkları karışımlarıyla karşılaştırılmalı olarak çalışılmıştır. 3 ayrı reaktörde çalışılmış ve her bir reaktör hacmi 12 L olarak belirlenmiştir. Sıcaklık olarak 30,5 °C ve fermentasyon süresi ise 40 gün sabit alınmıştır. Bu çalışmaların sonucunda toplam biyogaz üretim sığır gübresi için 0,0230 dm<sup>3</sup>/gün, kümes hayvanları gübresi için 0,0143 dm<sup>3</sup>/gün ve mutfak atıkları için 0,0318 dm<sup>3</sup>/gün olarak bulunmuştur. Fakat bu çalışmada biyogazın oluşum genellikle 40. günden sonrada devam eder ki bu çalışmada 40 günde işlem sonlandırılmıştır. Kümes hayvanlarının biyogaz üretim potansiyeli sığır gübresine göre yaklaşık olarak en az 2 katıdır [25]. Bu çalışmada ise sığır gübresinden üretilen biyogaz verimi tavuk gübresinden üretilene göre yaklaşık iki kat çıkmıştır. Bu sonuç tavuk gübresinin biyogaz potansiyelinden tam olarak

yararlanılmadığını gösterir. Bunun sebebi de C/N oranının belirli karışım oranlarına göre optimize edilmeden doğrudan deneylere başlanması olarak yorumlanmıştır [112].

Ziauddin ve Rajesh (2015) mutfak atıklarından biyogaz üretimi yapılırken metan üreten bakterilerin pH'ı 6,4-7,8 arasında belirlenmişlerdir. Fermantasyon işleminde ortamın pH'ı 6,4'ün altına düştüğü zaman ise sodyum hidroksit (NaOH) ile pH'ı 7'ye ayarlanmıştır. Bu çalışmada mutfak atıklarına aşım maddesi olarak sığır gübresi eklemiştir ve 37 °C çalışma sıcaklığı seçilmiştir. Deneyler toplam hacmi 2 litre olan 3 ayrı reaktörde gerçekleştirilmiştir. Mutfak atıkları: sığır gübresi karışım oranları sırasıyla; 4:1, 3:1, 5:1 olarak ve (% 75 su % 25 substrat olarak) belirlenmiştir. Deneylerin sonucunda 3:1 karışım oranının 4:1 karışım oranından % 250,63 daha fazla biyogaz ürettiği belirlenmiştir. 5:1 karışım oranından ise % 67,5 daha fazla biyogaz üretildiğini belirlenmiştir [38]. Çalışmada bize organik mutfak atıklarından üretilen biyogaz potansiyelinin sığır gübresi atıklarına göre kat kat daha fazla olduğunu ispatlamıştır [113].

Syaichurrozi (2013) sığır gübresi ve mutfak atıklarından biyogaz üretmiştir. Üretim için kurdukları sistemde 3 tane reaktörde çalışmışlardır. Bu reaktörlere sırasıyla mutfak atıkları (reaktör 1), mutfak atıkları ve sığır gübresi (reaktör 2) ve sığır gübresi (reaktör 3) olmak üzere 3 reaktörden oluşturulmuştur. Bu sistem oda sıcaklığına yakın şartlarda (25 - 30 °C) mezofilik şartlarda yürütülmüştür. Yürütülen bu çalışmada en yüksek verimin reaktör 2'de yani mutfak atıkları ve sığır gübresi karışımından elde edildiği gözlemlenmiştir. Mutfak atıklarının çok büyük biyogaz üretim potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır. Ancak mutfak atıklarından tek başına biyogaz üretiminin oldukça verimsiz olduğu ve bu verimi artırmak için diğer organik atıklarla karıştırılarak fermantasyona bırakılması gerektiği vurgulanmıştır [48]. Bu çalışmada yine mutfak atıklarının çok büyük bir biyogaz üretim verimine sahip olduğu belirlenmiştir. Karışım oranlarından daha yüksek verim alınmasının sebebi ise aslında oluşturulan substrat su karışımının C/N oranının 20 ila 30 arasında bir değere sahip olduğundan kaynaklanmıştır [114].

Malakahmad vd., (2015) mutfak ve lağım atıklarından biyogaz üretimini incelemiştir. Farklı oranlarda mutfak atıkları ve lağım atıkları kullanılan bu çalışmada optimum karışım oranı olarak; % 75 mutfak atıkları % 25 organik lağım atıkları olarak bulunmuştur. Bu çalışmada mutfak atıklarının C/N oranı 38,1 bulunmuştur. Fakat bu değer ideal olan 20-30 değer sınırını aştığı için bu oranı dengeleyici olarak C/N oranı 10 olan lağım atıklarından faydalanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda sadece mutfak atıklarından elde edilen

biyogaz oluşum hızı 0,05 m<sup>3</sup>/kg UK olarak bulunmuştur. % 75 mutfak atığı ve % 25 lağım atıkları karışımı ile C/N oranı dengelendikten sonra elde edilen sonuçlara göre biyogaz oluşum hızı ise 0,6 m<sup>3</sup>/kg uçucu katı olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar bize organik mutfak atıklarının çok büyük bir biyogaz oluşum potansiyeline sahip olduğunu fakat kendi başına bu üretimin verimsiz olduğunu ispatlamıştır. Fakat bu çalışmada çalışma sıcaklığı olarak sabit oda sıcaklığı uygulanmıştır ve biyogaz oluşumu kinetiği incelenmemiştir. Ayrıca farklı karışım oranlarında belirlenmiştir. Sadece belirli bir karışım oranında çalışılıp mutfak atıklarının biyogaz üretim verimi artırılmıştır. Önerilen bu projede ise belirli bir karışımda değil, yöntemlerde belirtildiği gibi 11 farklı karışımda çalışılacak ve optimum karışım oranı biyogaz oluşum potansiyeline göre belirlenecektir [115].

Temesgen ve Pappaterra (2017) atıksu arıtma çamuruna 20 kHz frekansında ve 20 dakika aralığında 0,05-0,21 kW/L ultrasonik ses dalgalarını uygulamışlardır. Bu ön işlem sayesinde çözünür kimyasal oksijen ihtiyacı (sCOD), çözünür toplam organik karbon (sTOC) ve çözünür toplam azot (sTN) artmıştır. 0,21 kWh/L ye yapılan ultrasonik ses şiddeti sayesinde ultrasonik ses dalgası yapılmayan işleme göre 2,3 kat daha fazla metan üretilmiştir [116].

Karray vd., (2015) bir grup makro algelere ultrasonik ses dalgası uygulamışlardır. Ultrasonik ses dalgalarının frekansı 40 kHz frekansında 120 W kullanılmıştır. 50 ml için 5 dakika süresince gerçekleştirilen ön işlem sonucunda 0,6 g/L daha fazla makroalgte şeker azalmasının olduğu gözlemlenmiştir [117].

Zou vd., (2016) ultrasonik ses dalgaları ön işlemi kullanarak taze hayvan gübresi ve mısır sapından biyogaz üretimini incelemiştir. Bu çalışmada uygulanan ultrasonik ses dalgaları; 0, 189, 39, 284,09, 378,79 kJ olarak sırasıyla 0-20-30 ve 40 dakika olarak belirlenmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 240,32 ml/g UK olarak belirlenmiştir. Ultrasonik ses dalgası yapılan ön işlemlerinden sonra maddenin molekül yapısı SEM ile görüntülenmiş ve yüzey kristalitesinin bozulduğu gözlemlenmiştir [118].

Rasopoor vd., (2016) kentsel katı atıklara biyogaz üretimi yapılırken ultrases dalgası ön işlemi uygulamışlardır. Bu ön işlem şiddeti 0,2 W/mL, 0,4 W/mL, 0,6 W/mL ve süreleri sırasıyla 10, 20 ve 30 dakika olarak belirlenmiştir. Optimum değerler karşılaştırmalı olarak farklı katı madde oranlarına göre (% 6, % 8, % 10) olacak şekilde değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Response Surface Methodology (RSM) programı kullanılarak optimum koşullar belirlenmiştir [119].

Wang vd., (2017) yüksek selüloz içeriğine sahip olan kırılmış çimlerden biyogaz üretmeyi denemişlerdir. Bu üretimden önce çim atıklarının ultrases dalgası ve alkali ön işlem uygulamışlardır. Bu çalışmanın amacı biyoreaktördeki organik atığın şeker veriminin ölçülmesidir. Harcanan şeker verimi ultrases dalgası ön işlemi sayesinde 3,5 kat daha fazla olmuştur. Verimde buna bağlı olarak artış göstermiştir [120].

Castrillón vd., (2011) hayvan gübresi ve ham gliserinden biyogaz üretimini incelemişlerdir. Ultrases dalgası ön işlemi 20 kHz, 0,1 kW ve 4 dakika olarak vurgulanmıştır. En iyi sonuçlar 364 ml CH<sub>4</sub>/g KOİ giderimi olarak ölçülmüştür [121].

Neumann vd., (2017) kanalizasyon çamurundan biyogaz üretirken ultrases dalgası ön işlemi uygulamışlardır. Sonuç olarak, karbohidratların ve proteinlerin sırasıyla % 427-1030 ve % 230-674 değerleri arasında biyoreaktörde fazla çözündüğü tespit edilmiştir. Sonuçlar Response Surface Methodology (RSM) ile modellenmiştir. Ön işlemler sayesinde metan verimi % 50 daha fazla üretilmiştir [122].

Braeutigam vd., (2014) tavuk gübresinden ultrases dalgaları ön işlemi uygulayarak biyogaz üretimini sağlamışlardır. Uygulanan ultrases frekansı 24 kHz ve şiddeti 0,08 - 0,25 kWh/kg OKM (organik kuru madde) olarak belirtilmiştir. Sonuç olarak % 41 daha fazla metan üretimi gerçekleşmiştir [123].

Lin vd., (2016) organik atıklardan biyogaz üretimine başlamadan önce alkali termal ön işlem uygulamışlardır. Düşük sıcaklıktaki optimum alkali termal ön işlem sıcaklığı 80 °C ve yüksek optimum alkali termal ön işlem sıcaklığı ise 120 °C olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak düşük sıcaklıkta daha az metan ve yüksek sıcaklıkta daha yüksek metan verimi elde edilmiştir. Fakat sistemin enerji ihtiyacı hesaplandığında yüksek sıcaklıktaki ön işlem maliyeti düşük sıcaklıktaki ön işlem maliyeti hesaplandığında toplamda düşük sıcaklıktaki metan üretiminin daha karlı ve avantajlı olduğu vurgulanmıştır [124].

Ana Cerar vd., (2016) mikroalglerden biyogaz üretimi incelemişlerdir. Bu üretimden önce termal ön işlem uygulanmıştır. Ön işlemsiz substrata yapılan AD sonrasında üretilen biyogazın verimi 157,5±18,720 mL CH<sub>4</sub>/g UK olarak bulunmuştur. Fakat termal ön işlem sonucunda bu metan üretiminin % 62 arttığı vurgulanmıştır [125].

## **5. MATERYAL VE METOT**

### **5.1. Kullanılan Hammaddeler ve Hammaddelerin Hazırlanması**

Çalışmada kullanılan organik maddeler taze sığır gübresi (SG), mısır silajı (MS) ve şeker pancarı küspesidir (ŞPK). Taze SG Giresun ilinin Boz tekke köyünden alınmıştır. MS ve ŞPK Bafra bölgesinden toplanmıştır. Alınan numuneler anaerobik fermantasyon sürecinde sürekli taze organik atık olarak kullanılmıştır. Taze SG laboratuvar ortamında içerisinde bulunan sap, saman, çakıl vb. maddelerden temizlenmiştir. MS ve ŞPK' ne de aynı işlemler uygulanmıştır. SG'nin taze olarak kullanılmasının amacı içerisinde bulundurduğu anaerobik mikroorganizmalar nedeniyle anaerobik süreci hızlandırmasıdır.

### **5.2. Çalışmada Kullanılan Hammaddelere Yapılan Analizler**

Organik atıklar toplandıktan sonra her bir numuneye nem, kuru madde, organik madde, % C, % N, KOİ, kül, selüloz, hemiselüloz, lignin ve SEM görüntü analizleri yapılmıştır.

#### **5.2.1. Nem ve kuru madde analizi**

Kuru madde analizi, anaerobik fermantasyon işlemine başlanmadan önce hemen hemen bütün organik atıklar nem içerdiğinden dolayı yapılmalıdır. Bu sayede toplam katı oranı belirlenmiş olur. Taze SG, MS, ŞPK numunelerinden her biri hassas terazide 2 gram tartılıp, etüvde 105 °C 'de içerisinde nem kalmayacak şekilde yaklaşık 48-72 saat boyunca kurutulmuştur. Kurutma işlemi porselen kroze ile yapılmıştır. Öncelikle porselen kroze etüvde 110 °C de 6 saat boyunca içerisinde hiç nem kalmayacak şekilde kurutulup darası alınmıştır. Kurutulan numunelerin böylelikle % katı madde oranları belirlenmiştir [126].

#### **5.2.2. Kül ve organik madde analizi**

Organik maddeler 550-600 °C sıcaklıkta uçucu hale gelmektedir. Kuru madde tayini yapılmış olan bu organik maddeler ayrı ayrı porselen krozeye konularak kül fırında 550 °C de 2,5-3 saat bekletilmiştir. Yakma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler alınarak desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Sonuç olarak, organik maddeler bu sıcaklıkta yanarak uçucu madde haline gelmektedir. Yandığında oluşan kül gravimetrik olarak tartılmıştır. Böylelikle kül ve organik madde miktarı bulunmuştur [126].



### **5.2.3. KOİ analizleri**

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), evsel ve endüstriyel atık suların kirlilik derecesini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Biyokimyasal oksijen ihtiyacı gibi ancak farklı olan organik maddenin biyokimyasal reaksiyonlar değil redoks reaksiyonlarıyla oksitlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu parametre ile atıkların bünyesindeki organik maddeler, kimyasal oksidasyonları için gerekli oksijen miktarı cinsinden belirlenir. Numunenin KOİ analizi 400 mg/L değerinden daha yüksek miktarlarda olduğundan açık reflux titrimetrik yöntemle yapılmıştır [126].

### **5.2.4. Selüloz analizleri**

Çalışmada organik atıklara selüloz tayini anaerobik sürece başlamadan önce, ön işlemler uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra yapılmıştır. Selüloz tayini yapılacak olan numunenin önce etüvde 70 °C'de kurutulduktan sonra selüloz analizi yapılmıştır. Selüloz analizleri Van Soest yöntemine göre ham lif ekstraktöründe yapılmıştır [128].

### **5.2.5. Hemiselüloz analizleri**

Çalışmada organik atıklara hemiselüloz tayini anaerobik sürece başlamadan önce, ön işlemler uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra yapılmıştır. Hemiselüloz tayini yapılacak olan numunenin önce etüvde 70 °C' de kurutulduktan sonra hemiselüloz analizi yapılmıştır. Lignin analizleri Van Soest yöntemine göre ham lif ekstraktöründe yapılmıştır [128].

### **5.2.6. Lignin analizleri**

Çalışmada organik atıklara lignin tayini anaerobik sürece başlamadan önce, ön işlemler uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra yapılmıştır. Lignin tayini yapılacak olan numunenin önce etüvde 70 °C' de kurutulduktan sonra da lignin analizi yapılmıştır. Lignin analizleri Van Soest yöntemine göre ham lif ekstraktöründe yapılmıştır [128].

### **5.2.7. Elementel analiz**

Organik numuneye C ve N değerlerini kütlece % bileşenlerini belirlemek amacıyla elementel analiz yapılmıştır. Elementel analiz Giresun Üniversitesi merkezi araştırma laboratuvarında bulunan Costech ECS 4010 Elementel analiz cihazı ile yapılmıştır.

### **5.2.8. SEM analizleri**

Organik numuneye ön işlem teknolojileri uygulandıktan sonra hammaddenin kristalitesindeki yapıyı yorumlamak için SEM analizleri yapılmıştır. Bu analizler Ordu Üniversitesi merkezi araştırma laboratuvarında bulunan Hitachi marka, Su 1510 model bir taramalı elektron mikroskobu kullanarak yapılmıştır.

### **5.2.9. Biyogaz içeriği analizleri**

Yapılan bütün deneyler sonucunda oluşan gaz miktarının içeriği % hacimsel olarak belirlenmiştir. Bu belirleme işlemi ‘‘IRCD4 Multi-Gas Detecting Alarm Manual Instruction’’ (biyogaz ölçüm cihazı) ile yapılmıştır. % hacimsel olarak belirlenen gazlar; CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S (ppm)’ dir.

### **5.3. Çalışmada kullanılan ekipmanlar ve deney düzenekleri**

Organik numunelerin SEM görüntüleri incelenmeden önce daha iyi iletkenlik sağlayabilmesi için altın nanopartiküller ile kaplanmıştır. Şekil 5.1’de organik numuneyi daha iletken hale getirmek için altın nanopartiküllerle kaplanmadan önceki hali üst kısımda verilmiştir. Alt kısımda ise Hitachi marka, Su 1510 model bir taramalı elektron mikroskobu görünmektedir. Şekil 5.2’ de ise organik numune altın nano parçacıklarla kaplama aşaması görünmektedir. Kaplama sırasında mor ışık ortaya çıkmıştır. Altın kaplama cihazı 30 mA ve 0,1 mbar değerinde olup 120 saniyede altın kaplama işlemi tamamlanmıştır.



**Şekil 5.1** Altın nanopartikül ile kaplanmadan önceki ve sonraki organik numune görüntüsü ile SEM cihazı



**Şekil 5.2** Organik numunelerin altın nanoparçacıklarla kaplama görüntüsü

Şekil 5.3'te organik maddelerin sulu karışımlara eklenen alkali ve asit ön işlemlerinden sonra görüntüsü verilmektedir. Alkali eklenen sulu karışım siyaha doğru bir renk alırken asit eklenen sulu karışım sarıya doğru bir renk almaktadır.



Şekil 5.3 Asit ve alkali ön işlem uygulanan organik numuneler

Şekil 5.4'te IRCD4 Multi-Gas Detecting Alarm Manual Instruction isimli bir biyogaz ölçüm cihazının görüntüsü verilmiştir. Biyogazın içerik analizi bu portatif gaz ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5.4 Portatif biyogaz ölçüm cihazı

Şekil 5.5’ te deneylerde kullanılan OHAUS marka STARTER 3000 model pH metrenin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.5 Çalışmada kullanılan pH metre

Şekil 5.6’da deneylerde kullanılan HEIDOLPH marka MR HEI - TEC model manyetik karıştırıcı ısıtıcının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.6 Çalışmada kullanılan manyetik karıştırıcı

Şekil 5.7’de deneylerde kullanılan MAPADA marka UV6100PCS model spektrofotometre görüntüsü verilmiştir.



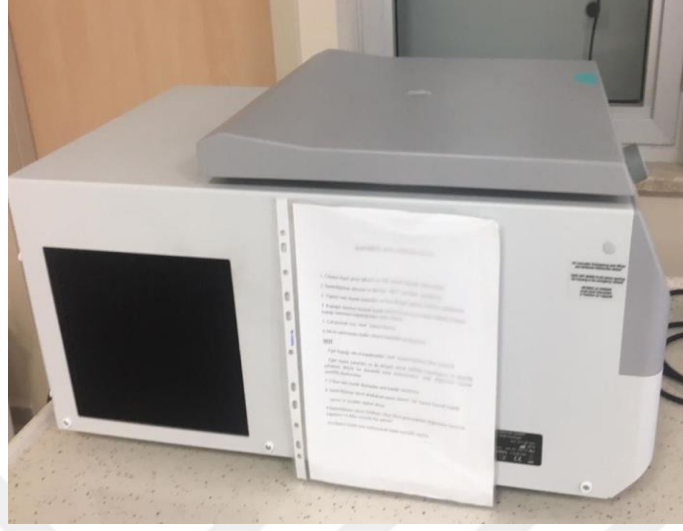
Şekil 5.7 Çalışmada kullanılan UV-vis spektrofotometre

Şekil 5.8’de 100 ve 120 °C sıcaklıkta termal ön işlem çalışmalarında kullanılan NÜVE marka 706 10 model otoklav görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.8 Çalışmada kullanılan otoklav

Şekil 5.9’da KOİ analizleri için çöktürme işlemlerinde kullanılan HERMLE marka 7326 K model santrifüj görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.9 Çalışmada kullanılan santrifüj

Şekil 5.10’da deneylerde kullanılan DOL-EKO marka ILW-115-STD model inkübatör görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.10 Çalışmada kullanılan etüv

Şekil 5.11’de ultrases dalga ön işlemlerinin uygulanmasında kullanılan BANDELIN marka SONOPULS model ultrases dalga cihazı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.11 Çalışmada kullanılan ultrases dalga cihazı

Şekil 5.12’de deneylerde kullanılan SHIMADZU marka AT224 model hassas terazi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.12 Çalışmada kullanılan hassas terazi



Şekil 5.13'te termal ve termokimyasal ön işlem sıcaklığı uygulamalarında kullanılan MAGMA TERM marka MT1205-S16 model kül fırın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.13 Çalışmada kullanılan kül fırın

Şekil 5.14'te anaerobik fermantasyon düzeneğinin hazırlık aşaması ve anaerobik düzenek verilmiştir. Şekilde sabit karıştırıcıda görüldüğü üzere her bir reaktör için 3 tekrarlı deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.14 Anaerobik fermantasyon düzeneği

## 5.4. Çalışmada Uygulanan Ön İşlem Teknolojileri

Organik atıkların çoğu lignoselülozik bileşenlerden oluşmaktadır. Lignoselülozik bileşenler arasında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin molekülünden anaerobik süreçlerde verim alınması amacıyla organik numuneye termal, alkali, asidik termokimyasal ve ultrases dalgası ön işlem teknolojileri uygulanmıştır.

### 5.4.1. Termal ön işlemler

Termal ön işlem sıcaklıkları; suyun kaynama noktası sıcaklığı (yaklaşık 100 °C), 120 °C, 150 °C ve 180 °C' de ayrı ayrı uygulanmıştır. Her bir ön işlem sıcaklığı 10, 20, 30, 60 ve 120 dakika olarak uygulanmıştır. Termal ön işlemler organik numunenin % 10 katı madde içeren sulu karışımlarına oda sıcaklığı ve suyun kaynama noktası sıcaklıkları için uygulanmıştır. 120 °C, 150 °C ve 180 °C için ise sadece katı kısma uygulanmıştır. Termal ön işlemler 150 °C ve 180 °C için kül fırında 200 °C sıcaklığa dayanıklı özel yapım şişelerin içinde uygulanmıştır. Suyun kaynama noktası sıcaklığı ve 120 °C sıcaklıktaki ön işlemler otoklavda uygulanmıştır.

### 5.4.2. Alkali ön işlemler

Alkali ön işlemler sulu karışımın içerisinde bulunan katı kütlesinin % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30'u kadar 8 N NaOH ve 8 N KOH çözeltilerinin oda sıcaklığında eklenmesi ile uygulanmıştır.

### 5.4.3. Asidik ön işlemler

Asidik ön işlemler sulu karışımın içerisinde bulunan katı kütlesinin % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30'u kadar % 15' lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HNO<sub>3</sub> çözeltilerinin oda sıcaklığında sulu karışıma eklenmesi ile uygulanmıştır.

### 5.4.4. Termokimyasal ön işlemler

Termokimyasal ön işlemler sulu karışıma suyun kaynama noktası sıcaklığında % 15'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HNO<sub>3</sub> çözeltilerinin eklenmesi ve 8 N NaOH ve 8N KOH çözeltilerinin eklenmesi ile iki ayrı şekilde uygulanmıştır. Sulu karışımlara suyun kaynama noktası sıcaklığında uygulanan alkali ve asit çözeltileri katı maddenin % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 30'u kadar eklenmiştir. Termokimyasal ön işlemlerde termal işlem 30 dakika sabit uygulanmıştır.

#### **5.4.5. Ultrases dalgası ön işlemleri**

Organik atıklara ultrases dalgası ön işlemleri farklı zaman aralıklarında ve farklı enerji şiddetlerde uygulanmıştır. Ultrases dalga frekansı sabit olarak 20 kHz ( $\pm 0,2$ ) alınmıştır. Organik atığa ultrases dalga ön işlemleri her zaman aralığı için 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 kJ şiddetinde içerisinde 10 gram katı madde olan 100 ml'lik karışımlara uygulanmıştır. Sonikatörde uygulanan her bir ultrases dalga şiddetinin uygulanma süresi 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika olarak belirlenmiştir.

#### **5.4.6. Uygulanan ön işlemler sonucunda suda çözünürlüğün belirlenmesi**

Organik numuneye ön işlem uygulandıktan sonra sabit tartıma getirilmiş cam pamukları yardımı ile çözünen madde miktarı gravimetrik olarak belirlenmiştir. Sabit tartıma getirilmiş cam pamukları belirli miktarda petri kaplarına koyulmuştur. Petri kaplarına koyulan cam pamukları önce 70 °C'de 48 saat süreyle kurutulmuş hazır hale getirilmiştir. Daha sonra suda çözünen katı madde miktarı cam pamuğunda bir miktar bulunduğu için cam pamuğu 70 °C 'de 48 saat kurutulduktan sonra tartılmıştır. Ön işlemler sonucunda suda çözünen katı madde miktarı, sulu karışımın cam pamukları ile süzülerek saptanmıştır.

#### **5.5. Anaerobik Fermantasyon İşlemleri**

Organik atıklardan biyogaz üretim prosesini incelemek amacıyla ilk olarak atıkları bir arada değerlendirmek için optimum karışım oranı belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu bağlamda SG:MS:ŞPK kütlece karışım oranları sırasıyla 1:0:0, 0:1:0, 0:0:1, 1:1:0, 1:0:1, 0:1:1, 1:2:0, 2:1:0, 0:1:2, 0:2:1, 2:0:1, 1:0:2, 2:1:1, 1:1:2, 1:2:1, 1:1:1, 2:2:1, 1:2:2, 2:1:2 olmak üzere 19 çeşit reaktör ile her biri 3 katlı olacak şekilde toplam 57 farklı reaktör ile optimum karışım oranı belirleme çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra anaerobik süreçte optimum karışım oranı belirlenen reaktöre ön işlem teknolojileri uygulanmıştır. Bütün deneylerde katı madde oranı kütlece % 10 olarak belirlenmiştir. Biyoreaktör olarak 500 ml'lik Nuçe erlenleri kullanılmıştır. Nuçe erlenlerinin çıkış borusuna uygun silikon hortum eklenmiştir ve bu hortumun ucuna da 0,30 litrelik gaz toplama torbaları takılmıştır. Daha sonrasında bütün reaktörler alüminyum folyo ile kaplanmıştır. Biyoreaktör olarak kullanılan nuçe erlenlerinin bütün deneylerde hacminin % 80'i sulu karışımıyla doldurulup ve % 20'si boş kalmıştır. Biyogaz üretmek için metan bakterilerinin bir miktar azota ihtiyacı vardır. Sistemdeki gaz kaçaklarını engellemek için hortumlarının giriş ve çıkışı bantlanmıştır. Fermantasyon işlemi için her bir reaktörün pH değeri ölçülmüştür. Bu

işlemede pH biyogaz değeri metan bakterilerinin üremesi için gerekli şartlar olan 6,6-7,6 değerinde değilse, bu aralıktaki değerlere gelene kadar hazırlanan 8 M NaOH ve 8 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tamponları ile ayarlama yapılmıştır. Isıtma sıcaklığı bütün deneyler için 40 °C olarak seçilmiştir. Isıtma işlemi alttan ısıtmalı manyetik karıştırıcı yardımıyla yapılmıştır. Deneylerin başlamasından sonra ortalama 12 saatte bir 3-4 dakika reaktörlerin manuel karıştırılması sağlanmıştır. Oluşan gaz miktarı 0, 3 litrelik biyogaz gaz toplama torbaları sayesinde ölçülmüş olup gaz oluşumu durana kadar devam etmiştir. Her bir reaktörün biyogaz oluşum hızı ml biyogaz/g KM olarak belirlenmiştir. Metanojen bakteriler, ışığa duyarlı bakterilerdir [129]. Alüminyum folyo ile sarma işlemi neticesinde karanlık ortamda anaerobik fermantasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Anaerobik süreç sonucunda biyogaz miktarı ve biyogaz bileşenleri % hacimsel olarak belirlenmiştir.

### **5.6 Anaerobik reaktöre CFD analizlerinin Uygulanması**

Reaktör içindeki sıcaklık dağılımı ve hız (akım) çizgileri çıkarılarak gözlemlenmiştir. Isıtılan reaktörde, ısı kayıpları belirlenerek ısıtma derecesi görsel olarak incelenmiştir. Bu bölümde su seviyesinin küçük 500 ml'lik nuçe erlenlerinin 400 ml'sine kadar doldurularak alt tabakadan düz bir plaka ile ısıtma sağlanmıştır. Bu nedenle, reaktördeki ısı ihtiyacı karşılanırken, sabit karıştırıcılı düz bir plaka etkilerinin hesaplanmasına yönelik gerekli olan sıcaklık dağılımları incelenmiştir ve ısı aktarımının şekli belirlenmiştir.

Nuçe erleni içinde 400 ml'lik kısmında % 10 katı madde içeren gübre su karışımı bulunmaktadır. Cam reaktörün yüzeyleri adyabatik olarak kabul edilmiştir. Nuçe erleninin boş kalan kısmı durgun havadan oluşmaktadır. Problem silindirik koordinatlarda iki boyutlu olarak incelenmiştir. Nuçe erleninin çıkış boynu atmosfer basıncına açıktır. Nuçe erleninin alt kısmında sabit sıcaklık sınır şartı 40 °C (313<sup>0</sup>K) tanımlanmıştır. Doğal konveksiyon koşulunda, enerji denklemi çözülerek erlen içindeki gübre hacminin sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Doğal konveksiyon koşulunda, Boussinesq modeli esas alınmıştır. Problemi çözerken kullanılan korunum denklemleri (süreklilik, momentum, enerji) sırasıyla aşağıdaki eşitlik (5.1), (5.2), (5.3) ve (5.4)'deki gibi ifade edilmiştir.

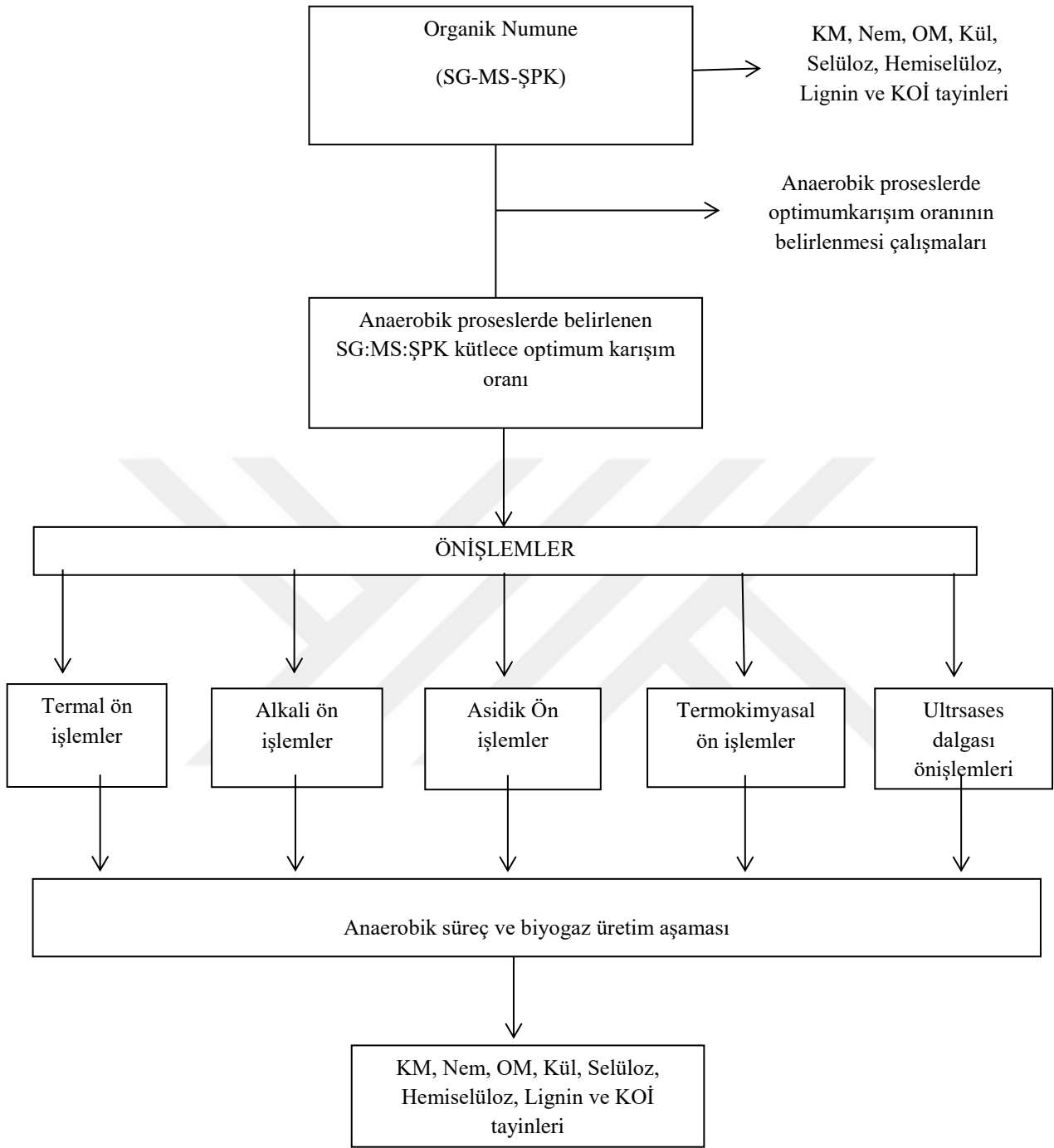
$$\frac{1}{x} \frac{\partial(ru)}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad [5.1]$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\beta g(T - T_\infty) - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial}{\partial x} (\rho - \rho_\infty) + \nu \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} (ru) \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad [5.2]$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial}{\partial z} (\rho - \rho_\infty) + \nu \left( \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left( x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad [5.3]$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left( x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad [5.4]$$





**Şekil 5.15** Organik atıklardan biyogaz üretim çalışmaları

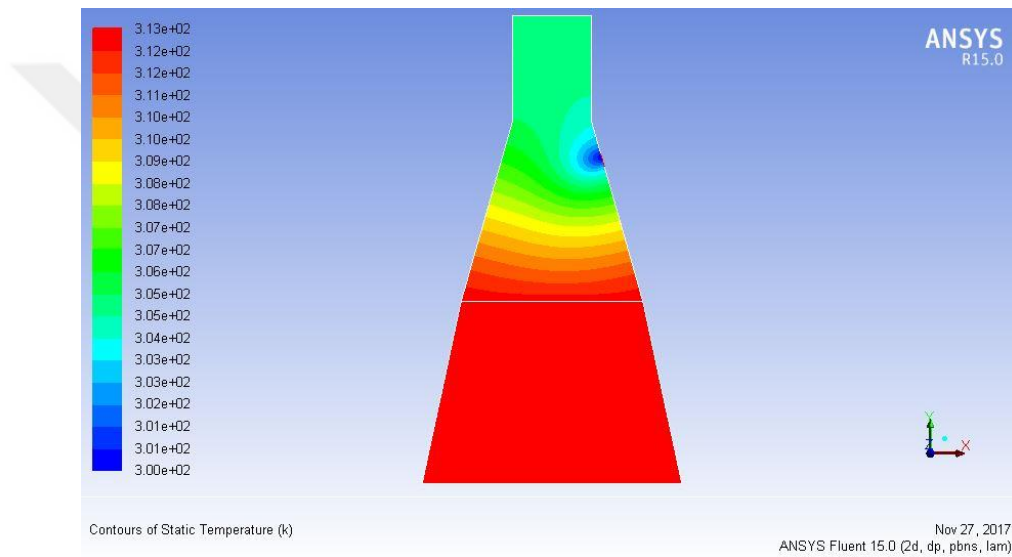
Organik maddelerden biyogaz üretim sürecini incelemek için yapılan çalışma planı organik maddeler hazırlandıktan sonra yapılmıştır. Bu çalışma planı Şekil 5.15'te verilmiştir.

## 6. BULGULAR

### 6.1. Reaktörlere Uygulanan CFD Analiz Sonuçları

Şekil 6.1’de y ve z yönleri; u, r-yönündeki hızı; v, z-yönündeki hızı;  $\nu$ , kinematik viskoziteyi;  $\alpha$ , ısı yayılım katsayısını;  $\rho$ , yoğunluğu;  $\beta$ , ısıl genleşme katsayısını ifade etmektedir.

Verilen parametre ve korunum denklemlerine göre simülasyonlar yapılmıştır. Bu denklemler (5.1), (5.2), (5.3) ve (5.4)’te ifade edilmişti. Elde edilen sıcaklık dağılımı şekil 6.1’de gösterilmektedir.



**Şekil 6.1** Anaerobik reaktörün sıcaklık dağılımının 2 boyutlu görünüşü

Sıcaklık dağılımı incelendiğinde, gübre-hava ara yüzeyinin 1,2 cm üzerinden itibaren ( $y=8,2$  cm) ısı kayıpları oluşmaya başladığı ve biyoreaktör üst kısmı ile çıkış boynunda 300 - 309 °K arasında sıcaklık dağılım skalasının mevcut olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, biyoreaktör içindeki gübrenin verilen hacminde ısı kaybı yaşanmamakta ancak, sabit sıcaklık sınır şartı yerine sabit ısı akısı koşulunda daha homojen bir dağılım elde edilebildiği görülmektedir.

### 6.2. Kullanılan Organik Maddeye Uygulanan Analiz Sonuçları

Anaerobik fermantasyon deneylerinden önce organik maddenin yapısındaki bileşenleri belirlemek üzere analizler yapılmıştır.



**Çizelge 6.1** Organik atığa uygulanan bazı analiz sonuçları

Parametre	SG	MS	ŞPK
KM (kütlece %)	18,80	32,10	84,62
OM (% KM)	82,80	92,54	86,62
Kül (kütlece %)	3,23	2,39	11,32
Nem (kütlece %)	81,20	77,90	15,38
% C (kütlece %)	32,12	44,92	43,25
% N (kütlece %)	1,65	1,39	15,90
KOİ (mg O <sub>2</sub> /L <sub>sulu</sub> karışım)	22680	12320	5800
C/N	19,46	32,31	27,03
pH	6,88	3,78	4,08
Selüloz (% KM)	22,30	25,90	30,55
Hemiselüloz (% KM)	18,92	19,49	25,92
Lignin (% KM)	12,85	4,01	3,91

Çizelge 6.1’de organik atığa anaerobik fermantasyona başlanmadan önce KM, OM (uçucu katı madde), kül, nem, C, N, KOİ, pH, selüloz, hemiselüloz ve lignin analizleri yapılmıştır. Atıklardaki organik maddenin yüksek oluşu, hammaddenin biyogaz üretiminde verimli bir şekilde kullanılabileceğini ifade etmektedir. Çizelge 6.1 incelendiğinde selüloz, hemiselüloz ve lignin oranları en yüksek ŞPK’da, en düşük ise SG’dedir. Bu lignoselülozik bileşenlerden yararlanmak için ön işlem teknolojilerinin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Fakat ön işlem teknolojileri verimli olmasına rağmen maliyetlidir. Ayrıca her hammaddenin ihtiyacı olduğu ön işlem teknolojisi farklıdır. Bu nedenle bu çalışmada ön işlem teknolojilerinin optimizasyonu incelenmiştir.

### 6.2.1. Optimum karışım oranı belirleme çalışmaları

Anaerobik çalışmalara anaerobik proseslerde organik atıkları bir arada değerlendirmek için çeşitli kütlece karışım oranları hazırlanarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon çalışmalarının reaktör sayısı, çeşitli karışım oranları, her bir reaktörün oluşturduğu anaerobik süreç, biyogaz üretim hızı ve % KOİ giderim verimi çizelge 6.2’de verilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda her bir reaktörün anaerobik fermantasyon süreci farklı bulunmuştur. Anaerobik fermantasyon süreci en az 50 gün, en fazla ise 65 gün sürmüştür. Gaz ölçümleri son 5 gün üst üste eşit hacimlerde ölçüldüğü zaman süreç durdurulmuştur. Optimizasyon çalışmaları sonucunda en fazla % KOİ giderimi 55,9 ve en az 25,9 olarak gerçekleşmiştir. En yüksek biyogaz oluşumu ise SG:MS:ŞPK kütlece karışım oranı 2:1:1 olan reaktörde 180,5 ml/g KM değerinde gerçekleşmiştir. Bu nedenle çalışmanın ikinci aşamasında SG:MS:ŞPK kütlece karışım oranı 2:1:1 olan reaktöre ön işlem teknolojilerindeki uygulanmıştır.

**Çizelge 6.2** Optimum karışım oranı çalışmaları sonucunda biyogaz üretim hızları

Reaktör adı	SG:MS:ŞPK kütlece karışım oranı	% Suda çözünme	Anaerobik fermantasyon süresi (gün)	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	Toplam KOİ giderimi (%)
R <sub>1</sub>	1:0:0	35,1	75	162,0	50,1
R <sub>2</sub>	0:1:0	15,2	95	105,5	30,1
R <sub>3</sub>	0:0:1	8,2	105	95,2	25,9
R <sub>4</sub>	1:1:0	16,5	81	125,1	33,9
R <sub>5</sub>	1:0:1	17,2	89	135,2	36,8
R <sub>6</sub>	0:1:1	16,1	98	110,9	32,9
R <sub>7</sub>	1:2:0	15,5	74	135,2	36,0
R <sub>8</sub>	2:1:0	24,5	79	143,2	39,9
R <sub>9</sub>	0:1:2	16,5	100	129,5	35,1
R <sub>10</sub>	0:2:1	25,2	95	159,9	42,5
R <sub>11</sub>	2:0:1	26,5	74	150,2	40,1
R <sub>12</sub>	1:0:2	24,1	95	151,5	42,2
R <sub>13</sub>	2:1:1	42,1	73	180,5	55,9
R <sub>14</sub>	1:1:2	26,7	89	145,8	40,2
R <sub>15</sub>	1:2:1	27,8	84	140,5	39,2
R <sub>16</sub>	1:1:1	31,1	82	170,8	51,5
R <sub>17</sub>	2:2:1	32,4	79	175,8	52,9
R <sub>18</sub>	1:2:2	25,5	86	154,3	42,5
R <sub>19</sub>	2:1:2	26,9	80	149,9	41,5

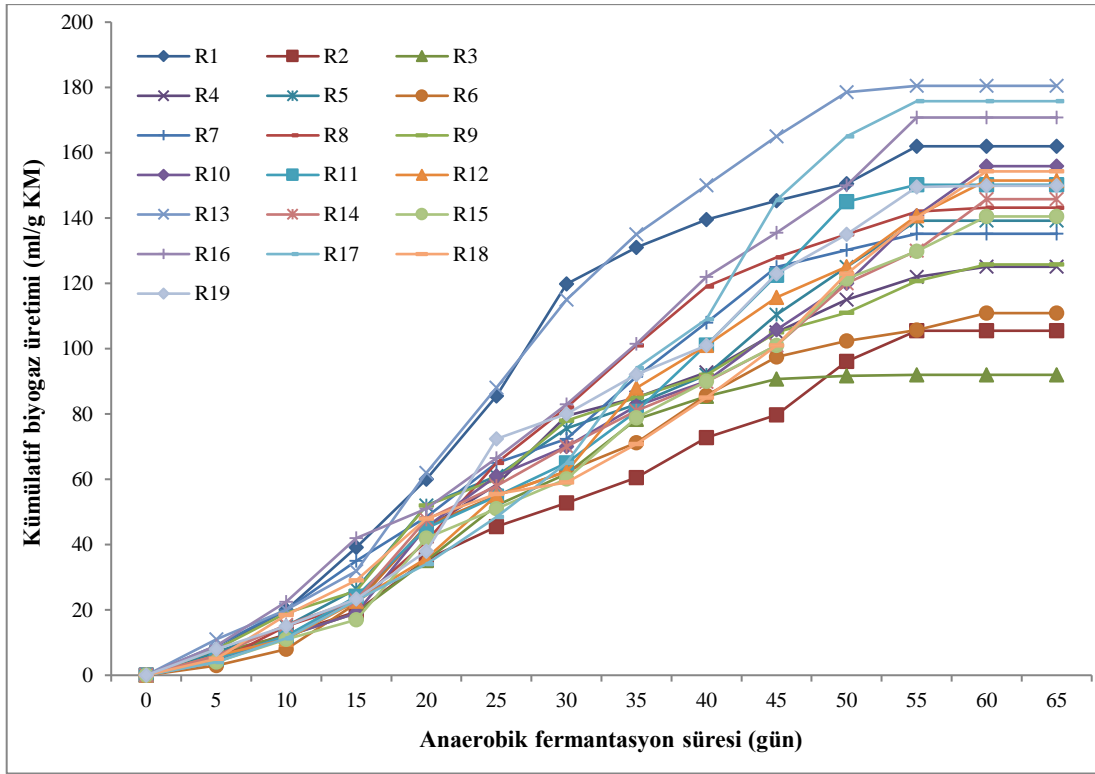
Optimizasyon çalışmaları sonucunda oluşan gazlar gaz toplama torbalarına toplandıktan sonra portatif biyogaz analiz cihazı ile her bir reaktörün gaz içeriği çizelge 6.3'te verilmiştir. İçeriği belirlenen gazlar CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S' dir. En yüksek CH<sub>4</sub> içeriği R<sub>2</sub> reaktöründe hacimce % 65,8 olarak ölçülmüştür. En yüksek CO<sub>2</sub> içeriği ise % 40,0 olarak R<sub>11</sub> reaktöründe belirlenmiştir. H<sub>2</sub>S içeriği ise en yüksek sadece mısır silajı ile yürütülen R<sub>2</sub>'de 1234 ppm olarak meydana gelmiştir. En düşük ise sadece sığır gübresi ile yürütülen R<sub>1</sub>'de 452 ppm değerinde ölçülmüştür. En yüksek verim elde edilen R<sub>13</sub>'de ise H<sub>2</sub>S değeri 913 ppm olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 6.3** Optimizasyon çalışmaları sonucunda reaktörlerin oluşturduğu biyogaz içeriği

Reaktör adı	SG:MS:ŞPK kütlece karışım oranı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği (ppm)
R <sub>1</sub>	1:0:0	62,3	37,2	458
R <sub>2</sub>	0:1:0	65,8	33,9	1234
R <sub>3</sub>	0:0:1	64,5	35,1	958
R <sub>4</sub>	1:1:0	65,1	34,7	752
R <sub>5</sub>	1:0:1	64,8	35,0	709
R <sub>6</sub>	0:1:1	63,9	35,8	1050
R <sub>7</sub>	1:2:0	65,1	34,5	1052
R <sub>8</sub>	2:1:0	61,5	38,1	850
R <sub>9</sub>	0:1:2	62,4	37,5	1015
R <sub>10</sub>	0:2:1	63,5	36,1	1152
R <sub>11</sub>	2:0:1	59,9	40,0	877
R <sub>12</sub>	1:0:2	61,8	38,0	823
R <sub>13</sub>	2:1:1	65,0	34,7	913
R <sub>14</sub>	1:1:2	62,2	37,8	1020
R <sub>15</sub>	1:2:1	63,3	36,5	996
R <sub>16</sub>	1:1:1	65,5	34,2	855
R <sub>17</sub>	2:2:1	63,9	35,9	806
R <sub>18</sub>	1:2:2	61,8	38,0	994
R <sub>19</sub>	2:1:2	62,2	37,5	795

Şekil 6.2’de optimizasyon amacıyla kurulan 19 çeşit reaktörün anaerobik süreci verilmiştir. Süreç 50-65 günde tamamlanmıştır. En yüksek biyogaz üretimi R<sub>13</sub> nolu reaktörde meydana gelmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde bütün reaktörler anaerobik süreç boyunca artan şekilde biyogaz üretiminin gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

SG: MS: ŞPK kütlece karışım oranı 2:1:1 olan R<sub>13</sub> reaktöründe en yüksek biyogaz üretimi meydana geldiğinden bütün ön işlemler bu karışım oranına uygulanmıştır.



Şekil 6.2 Optimizasyon çalışmalarındaki 19 adet reaktörün anaerobik süreci

### 6.2.2. Termal ön işlem sonuçları

Farklı sıcaklık ve farklı zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda reaktörler ile anaerobik koşullarda biyogaz üretimi sağlanmıştır. Bu süreç sonucunda oluşan biyogaz miktarı, % fazla biyogaz üretimi ve toplam % KOİ giderimi çizelge 6.4'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre en yüksek biyogaz üretimi termal ön işlem sıcaklığı 100, 150 ve 180 °C için 60 dakika uygulanan ön işlem sonucu belirlenmiştir. 120 °C ön işlem sıcaklığında ise ön işlem süresinin 120 dakika olduğu reaktörde en yüksek biyogaz verimi gerçekleşmiştir. Fakat bu değer teorik olarak yüksek olsa da 120 °C ön işlem sıcaklığında 60 dakika boyunca termal ön işlem uygulanan reaktör ile 120 dakika ön işlem uygulanan reaktör arasında 2,6 ml/g KM biyogaz üretim farkı vardır. Ön işlem maliyetleri göz önünde bulundurulacak olursa bütün termal ön işlem sıcaklıklarında ki en ideal reaktör 60 dakika ön işlemin uyguladığı reaktördür. Bu reaktörler arasında en yüksek biyogaz üretimi ise 362,1 ml/g KM değerinde belirlenmiştir.

Termal ön işlem uygulandıktan sonra numunelerin suda çözünürlüğü ön işlemin uygulanma süresi ve miktarına göre değişiklik göstermiştir. Genel olarak ön işlem sıcaklığı ve ön işlem şiddeti arttıkça suda çözümler artmıştır. En az suda çözünme % 4,1 oranında

gerçekleşirken, en fazla suda çözünme % 50,5 oranında belirlenmiştir. Biyogaz üretim hızı genellikle suda çözünme ile doğru orantılı olarak artmıştır.

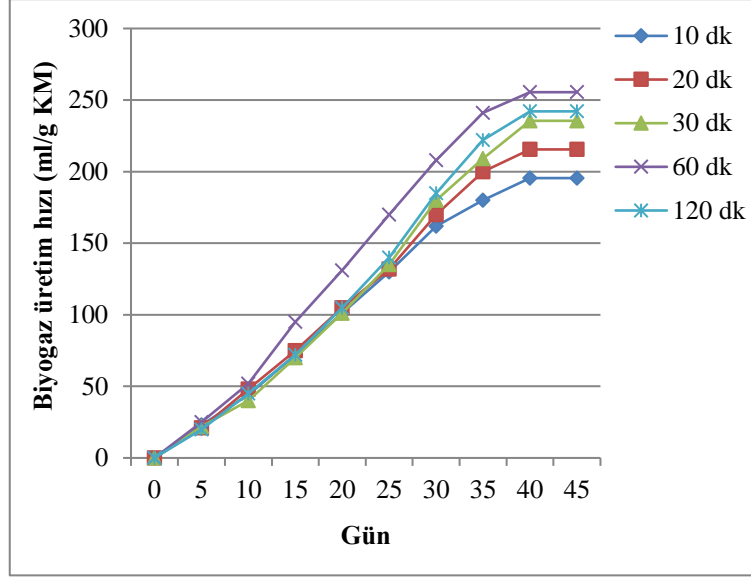
Termal ön işlem sonucunda ön işlem sıcaklıkları ve ön işlem süreleri biyogaz üretimi üzerinde büyük farklılıklar yaratmıştır. Çizelge 6.4 incelenecek olursa 100 °C’de 120 dakika boyunca uygulanan ön işlemin anaerobik süreci sonucunda oluşturduğu biyogaz üretimi 242,1 ml/g KM iken 120 °C’de 30 dakika boyunca uygulanan ön işlemin anaerobik süreci sonucunda oluşturduğu biyogaz üretimi 242,9 ml/g KM değerinde bulunmuştur. Bu değerler birbirine çok yakındır. Bu bağlamda 120 °C’de 30 dakika maliyeti 100 °C’de 120 dakika maliyetinden çok azdır. Tercih edilmesi gereken reaktör 120 °C’de 30 dakika ön işlem uygulanan ön işlem reaktördür.

**Çizelge 6.4** Organik atığa uygulanan termal ön işlem sonuçları

Ön işlem sıcaklığı (°C)	Ön işlem süresi (dk)	% Fazla suda çözünme	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
100	10	4,1	R <sub>20</sub>	195,5	8,3	60,1
	20	10,5	R <sub>21</sub>	215,5	19,3	62,4
	30	12,4	R <sub>22</sub>	235,5	30,4	64,3
	60	20,5	R <sub>23</sub>	255,5	41,5	68,0
	120	20,1	R <sub>24</sub>	242,1	34,1	62,0
120	10	5,1	R <sub>25</sub>	201,4	11,5	55,1
	20	7,9	R <sub>26</sub>	212,0	17,4	61,1
	30	13,9	R <sub>27</sub>	242,9	34,5	63,0
	60	25,4	R <sub>28</sub>	285,5	58,1	69,2
	120	22,6	R <sub>29</sub>	288,1	59,6	70,0
150	10	10,1	R <sub>30</sub>	222,5	23,2	62,0
	20	15,6	R <sub>31</sub>	235,8	30,6	64,1
	30	12,5	R <sub>32</sub>	245,0	35,7	65,2
	60	25,6	R <sub>33</sub>	280,0	55,1	68,1
	120	27,8	R <sub>34</sub>	275,6	52,6	67,3
180	10	14,5	R <sub>35</sub>	232,2	28,6	60,1
	20	19,9	R <sub>36</sub>	245,0	35,7	64,2
	30	50,5	R <sub>37</sub>	355,0	96,6	85,0
	60	48,9	R <sub>38</sub>	362,1	100,6	80,1
	120	38,5	R <sub>39</sub>	325,5	80,3	75,4

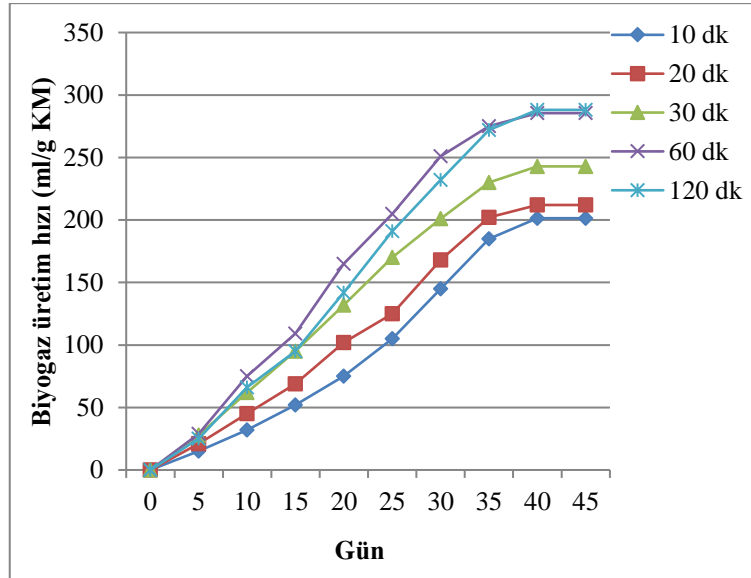
#### 6.2.2.1. Termal ön işlem sonucunda reaktörlere uygulanan anaerobik süreç

Termal ön işlem uygulandıktan sonra her bir ön işlem süresi ve her bir ön işlem derecesi anaerobik süreç boyunca incelenmiştir. Anaerobik süreç boyunca 5 günde bir biyogaz hacim ölçümü yapılmıştır. Termal ön işlem uygulandıktan sonra anaerobik fermantasyon süreci 50-65 günden 40-45 güne gerilemiştir.



**Şekil 6.3** 100 °C'de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci

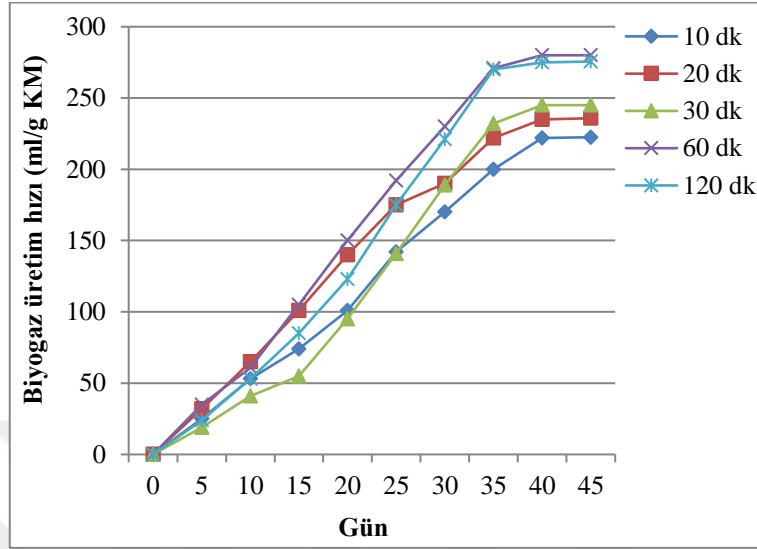
Şekil 6.3' de 100 °C'de ve çeşitli zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 255,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 195,5 ml/g KM olarak meydana gelmiştir. Böylece 100 °C'de uygulanan termal ön işlem sonucunda en yüksek artış % 41,5 oranında gerçekleşirken en düşük artış % 8,3 oranında olmuştur.



**Şekil 6.4** 120 °C'de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci

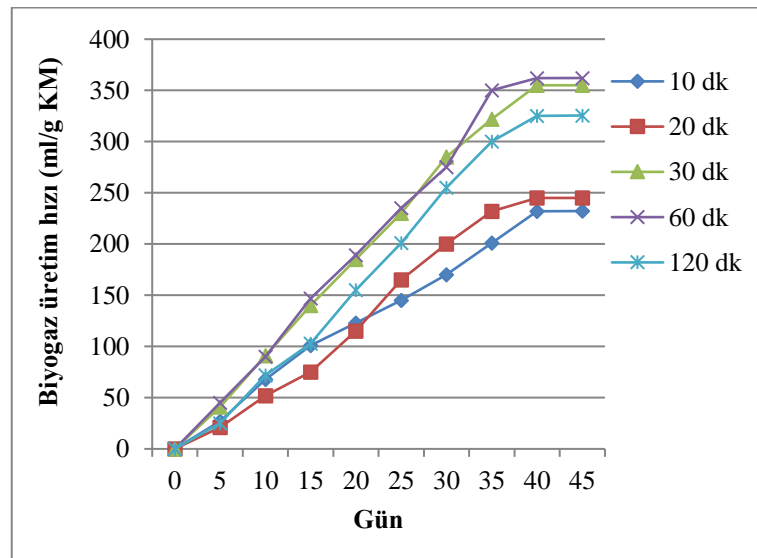
Şekil 6.4'te 120 °C' de ve farklı zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 288,1 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 201,4 ml/g KM değerinde

oluşmuştur. Bu bağlamda 120 °C’de uygulanan termal ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki artış en yüksek % 59,6 oranında gerçekleşirken, en düşük % 11,5 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 6.5 150 °C’de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci

Şekil 6.5’de 150 °C’de ve farklı zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 280,0 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 222,5 ml/g KM olarak meydana gelmiştir. Böylece 150 °C’de uygulanan termal ön işlem sonucunda en yüksek biyogaz üretimindeki artış % 55,1 oranında olurken en düşük artış % 23,2 oranında gerçekleşmiştir.

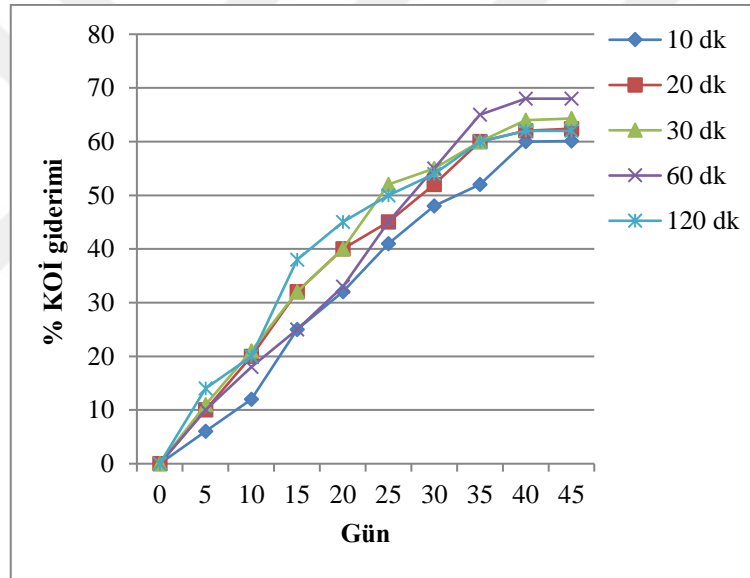


Şekil 6.6 180 °C’de termal ön işlem uygulanan organik atığın anaerobik süreci

Şekil 6.6'da 180 °C 'de ve çeşitli zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 362,1 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 232,2 ml/g KM değerinde meydana gelmiştir. Böylece 150 °C'de uygulanan termal ön işlem sonucunda en yüksek biyogaz üretimindeki artış % 100,6 oranında olurken en düşük artış % 28,6 oranında gerçekleşmiştir.

#### 6.2.2.2. Termal ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci

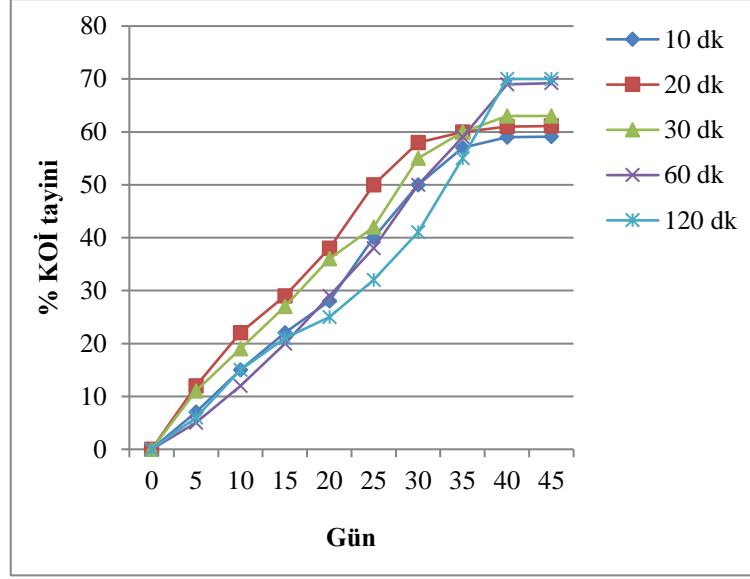
Termal ön işlem uygulandıktan sonra her bir ön işlem süresi ve her bir ön işlem derecesi anaerobik süreç boyunca incelenmiştir. Reaktörlerden her 5 günde bir numune alınıp KOİ tayini yapılmıştır.



Şekil 6.7 100 °C'de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi

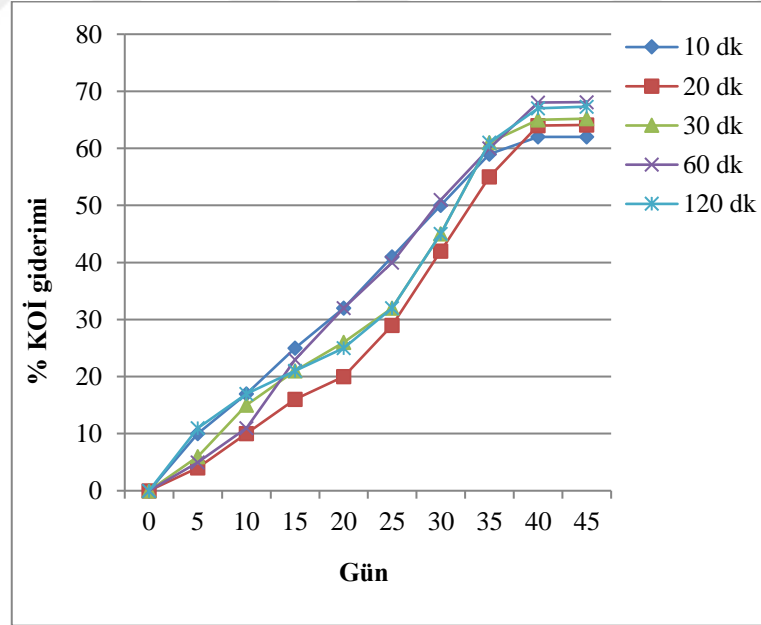
Şekil 6.7' de 100 °C'de ve çeşitli zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik sürecin % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 68, en düşük % KOİ giderimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 60,1 oranında meydana gelmiştir.





Şekil 6.8 120 °C’de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi

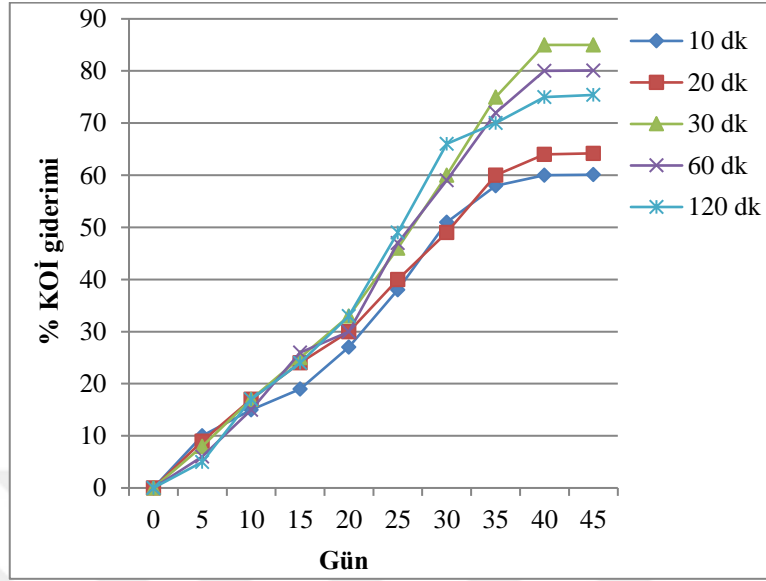
Şekil 6.8’ de 120 °C’de ve farklı zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik sürecin % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 70,0 oranında, en düşük % KOİ giderimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 59,1 oranında meydana gelmiştir.



Şekil 6.9 150 °C’de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi

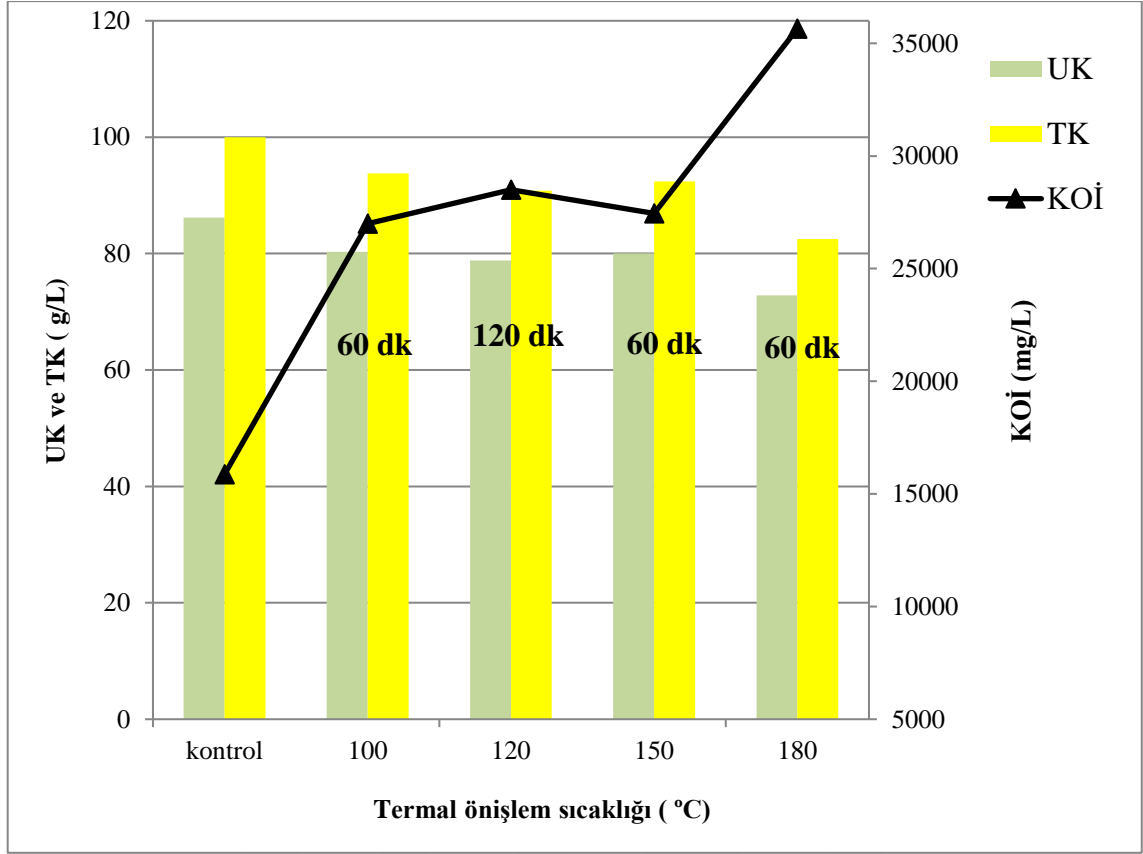
Şekil 6.9’da 150 °C’de ve çeşitli zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik sürecin % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde %

68,1, en düşük % KOİ giderimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 62 oranında meydana gelmiştir.



Şekil 6.10 180 °C'de termal ön işlem için anaerobik süreçteki % KOİ giderimi

Şekil 6.10'da 180 °C'de ve çeşitli zaman aralıklarında uygulanan termal ön işlem sonucunda anaerobik sürecin % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 85 oranında, en düşük % KOİ giderimi 10 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 60,1 oranında meydana gelmiştir.



**Şekil 6.11** Termal ön işlem sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim

Şekil 6.11’de organik maddeye uygulanan termal ön işlem sonucunda optimize edilen ön işlem sürelerinin TK, UK ve KOİ miktarları arasındaki ilişki verilmiştir. Başlangıçta organik maddenin KOİ değeri 15870 mg/L değeri, 180 °C ön işlem sıcaklığı 60 dakika boyunca uygulandığında, süzme işleminden sonra toplam KOİ miktarı 35650 mg/L değerine ulaşmıştır. Böylece KOİ değeri ön işlem uygulandıktan sonra % 124,6 oranında artmıştır. En az KOİ giderimi ise 100 °C ön işlem sıcaklığında 26990 mg/L olarak ölçülmüştür. En az KOİ miktarı ise % 70,0 oranında artmıştır. Ön işlemler uygulandıktan sonra TK ile birlikte UK miktarıda azalmıştır.

### 6.2.2.3 Termal ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi

Termal ön işlem uygulanan reaktörlerin anaerobik fermantasyon sonucu oluşturdukları ortalama biyogaz miktarlarının içeriği belirlenmiştir.

Çizelge 6.5 Termal ön işlem sonucunda biyogaz içerik analizi

Ön işlem sıcaklığı (°C)	Ön işlem süresi (dk)	Reaktör adı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği (ppm)
100	10	R <sub>20</sub>	62,5	37,2	959
	20	R <sub>21</sub>	63,7	38,0	962
	30	R <sub>22</sub>	65,0	34,9	966
	60	R <sub>23</sub>	64,2	35,5	955
	120	R <sub>24</sub>	63,5	37,0	1029
120	10	R <sub>25</sub>	60,8	39,1	1002
	20	R <sub>26</sub>	59,9	39,5	1059
	30	R <sub>27</sub>	62,4	37,2	1050
	60	R <sub>28</sub>	58,9	41,0	1122
	120	R <sub>29</sub>	63,7	36,0	1166
150	10	R <sub>30</sub>	64,4	35,0	1012
	20	R <sub>31</sub>	62,7	37,1	1129
	30	R <sub>32</sub>	63,9	35,6	1147
	60	R <sub>33</sub>	64,0	35,7	1198
	120	R <sub>34</sub>	62,9	37,1	1188
180	10	R <sub>35</sub>	64,1	35,5	995
	20	R <sub>36</sub>	64,5	35,4	1068
	30	R <sub>37</sub>	65,0	32,1	1088
	60	R <sub>38</sub>	66,1	33,8	1099
	120	R <sub>39</sub>	65,4	34,2	1156

Çizelge 6.5'te farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde uygulanan termal ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi yapılmıştır. 100 °C ön işlem sıcaklığında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 65 oranında, 120 °C ön işlem sıcaklığında en yüksek metan içeriği % 63,7, 150 °C ön işlem sıcaklığında en yüksek metan içeriği % 64,4 oranında, 180 °C ön işlem sıcaklığında en yüksek metan içeriği % 65,4 olarak bulunmuştur. H<sub>2</sub>S içeriği ise bütün ön işlem sıcaklıkları için en yüksek 1156 ppm değerinde R<sub>39</sub>'da ve en düşük 955 ppm değerinde R<sub>23</sub>'te meydana gelmiştir. H<sub>2</sub>S değerleri ön işlem sıcaklığı ve uygulanma süresi artıkça genel olarak artma eğilimi göstermiştir.

#### 6.2.2.4. Termal ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim

Organik maddelere termal ön işlem uygulandıktan sonra her bir reaktörün selüloz, hemiselüloz ve lignin analizleri yapılmıştır.

**Çizelge 6.6** Termal ön işlem öncesi ve sonrasında hammaddenin içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarı

Termal ön işlem sıcaklığı (°C)	Termal ön işlem süresi (dk)	Reaktör adı	Selüloz çözünmesi (%)	Hemiselüloz çözünmesi (%)	Lignin çözünmesi (%)
100	10	R <sub>20</sub>	5,1	2,3	2,4
	20	R <sub>21</sub>	9,8	15,7	10,1
	30	R <sub>22</sub>	14,1	21,8	13,5
	60	R <sub>23</sub>	14,5	21,9	13,5
	120	R <sub>24</sub>	14,8	22,2	13,4
120	10	R <sub>25</sub>	4,2	2,5	2,9
	20	R <sub>26</sub>	12,6	18,0	10,5
	30	R <sub>27</sub>	14,6	20,2	12,1
	60	R <sub>28</sub>	15,7	22,9	13,6
	120	R <sub>29</sub>	15,9	23,2	13,9
150	10	R <sub>30</sub>	8,3	3,2	6,5
	20	R <sub>31</sub>	10,2	5,8	9,2
	30	R <sub>32</sub>	17,6	30,1	17,1
	60	R <sub>33</sub>	20,8	32,4	19,9
	120	R <sub>34</sub>	22,9	33,5	20,2
180	10	R <sub>35</sub>	17,0	18,4	6,5
	20	R <sub>36</sub>	25,2	22,4	11,2
	30	R <sub>37</sub>	35,1	30,0	20,1
	60	R <sub>38</sub>	38,2	32,9	23,2
	120	R <sub>39</sub>	39,1	33,1	23,4

Çizelge 6.6’da farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde uygulanan termal ön işlem sonucunda oluşan organik numuneye ait selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriklerinin suda çözünme yüzdeleri verilmiştir. 100 °C ön işleminde selüloz çözünmesi en fazla 120 dakika ön işlem süresinin olduğu reaktörde kütlece % 14,8 oranında çözüldüğü anlaşılmıştır. Fakat 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde ise selüloz değeri % 14,5 oranında çözülmüştür. Benzer şekilde hemiselüloz 60 dakikada % 21,9 oranında çözülmüşken, 120 dakika ön işlem süresinde % 22,2 oranında çözülmüştür. Kütlece lignin içerikleri de 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktörde % 13,5 oranında çözünürken, 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 13,4 oranında ölçülmüştür. Bu nedenle ideal reaktör ön işlem

maliyeti açısından 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktör (R<sub>23</sub>) olarak kabul edilmiştir.

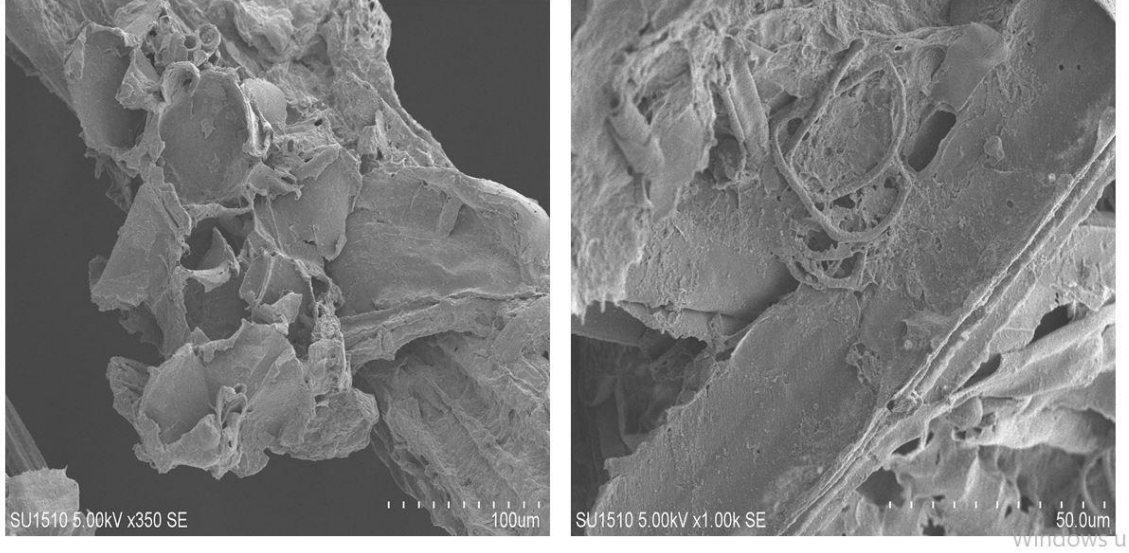
120 °C ön işlemde selüloz çözünmesi en fazla 120 dakika ön işlem süresinin olduğu reaktörde % 15,9 oranında çözündüğü anlaşılmıştır. Fakat 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde ise selüloz değeri % 15,7 oranında çözünmüştür. Benzer şekilde hemiselüloz 60 dakikada % 22,9 oranında çözünürken 120 dakika ön işlem süresinde % 23,2 oranında çözünmüştür. Lignin içerikleride 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktörde % 13,6 çözünürken, 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 13,9 oranında ölçülmüştür. Bu nedenle ideal reaktör ön işlem maliyeti açısından 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktör olarak R<sub>28</sub> kabul edilmiştir.

150 °C ön işlemde selüloz çözünmesi en fazla 120 dakika ön işlem süresinin olduğu reaktörde % 22,9 değerinde çözündüğü anlaşılmıştır. Fakat 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde ise selüloz değeri % 20,8 oranında çözünmüştür. Benzer şekilde hemiselüloz 60 dakikada % 32,4 oranında çözünmüşken 120 dakika ön işlem süresinde % 33,5 oranında çözündüğü ölçülmüştür. Lignin içerikleri de 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktörde % 19,9 oranında çözünürken, 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 20,2 oranında çözündüğü ölçülmüştür. Bu nedenle ideal reaktör ön işlem maliyeti açısından 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktör olarak R<sub>33</sub> kabul edilmiştir.

180 °C ön işlemde selüloz çözünmesi en fazla 120 dakika ön işlem süresinin olduğu reaktörde % 38,2 değerinde çözündüğü anlaşılmıştır. Fakat 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde ise selüloz değeri kütlece % 39,1 oranında çözünmüştür. Benzer şekilde hemiselüloz 60 dakikada % 32,9 oranında çözünmüşken 120 dakika ön işlem süresinde % 33,1 oranında çözündüğü ölçülmüştür. Lignin içerikleri de 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktörde % 23,2 oranında çözünürken, 120 dakika ön işlem uygulanan reaktörde % 23,4 oranında çözünmüştür. Bu nedenle ideal reaktör ön işlem maliyeti açısından 60 dakika ön işlem süresinin uygulandığı reaktör olarak R<sub>38</sub> kabul edilmiştir.

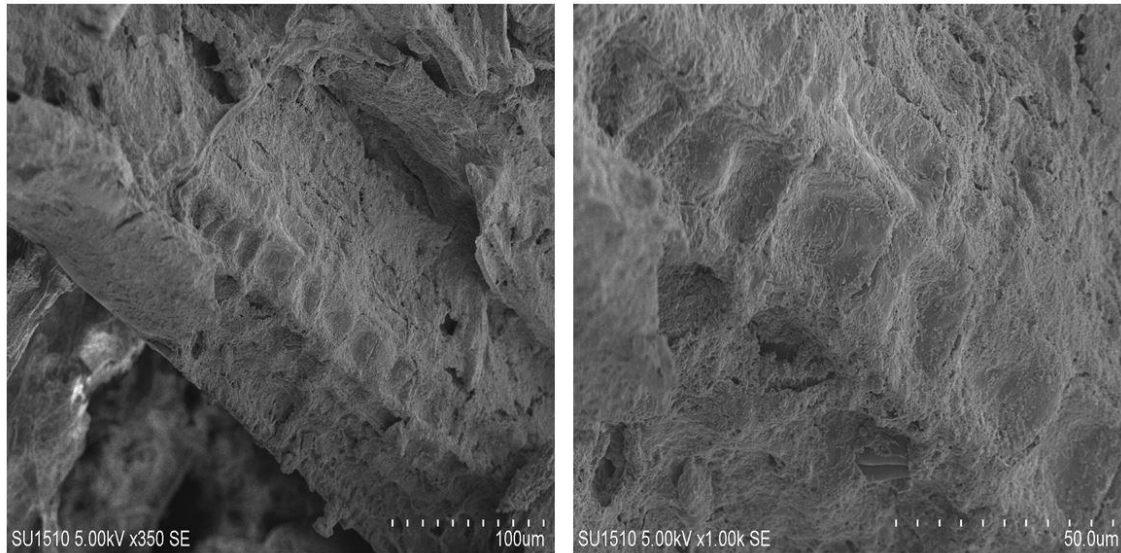
### 6.2.2.5. Termal ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri

Organik numunelere termal ön işlem uygulandıktan sonra SEM görüntüleri incelenmiştir.



**Şekil 6.12** Ön işlem uygulanmayan organik maddenin SEM görüntüleri

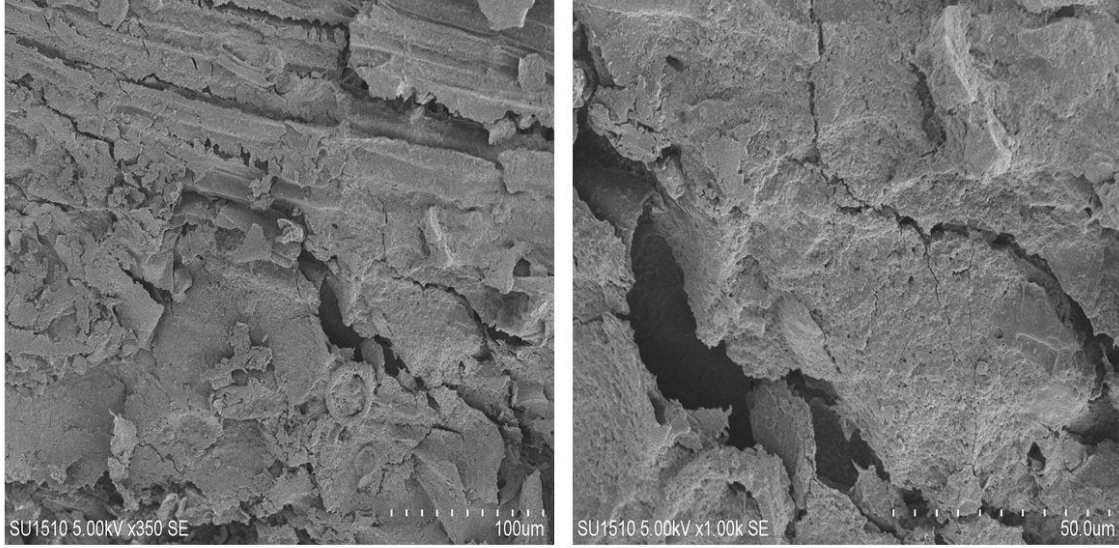
Şekil 6.12’de herhangi bir ön işlem uygulanmayan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin olduğu, gözenekli bir yapı olmadığı ve yüzey görünümünün sert bir tabakadan oluştuğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 6.13** 100 °C’de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri

Şekil 6.13’te 100 °C’de termal ön işlem uygulanan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik

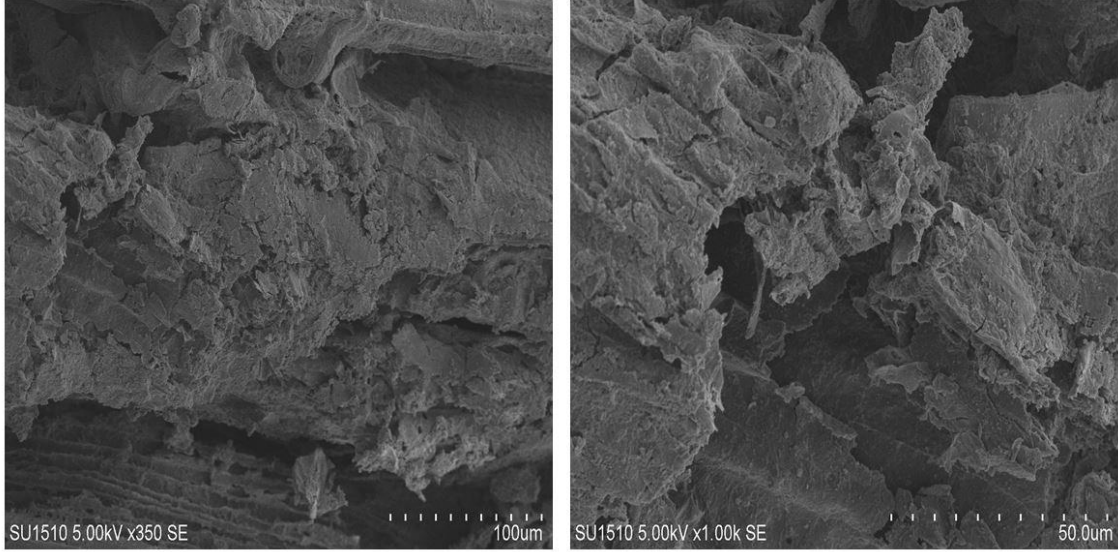
numunenin yüzey kristalitesinin çok az kırıldığı ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu görünmektedir. Gözenek boyutlarının yaklaşık 10-20  $\mu\text{m}$  olduğu görünmektedir. Bu gözeneklerin 100  $^{\circ}\text{C}$  ön işlem sıcaklığında ve 60 dakikada açılmadığı görünmektedir. Bunun muhtemel nedenleri arasında sıcaklığın düşük olması ya da ön işlem süresinin yetersiz olması gelmektedir.



**Şekil 6.14** 120  $^{\circ}\text{C}$ 'de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri

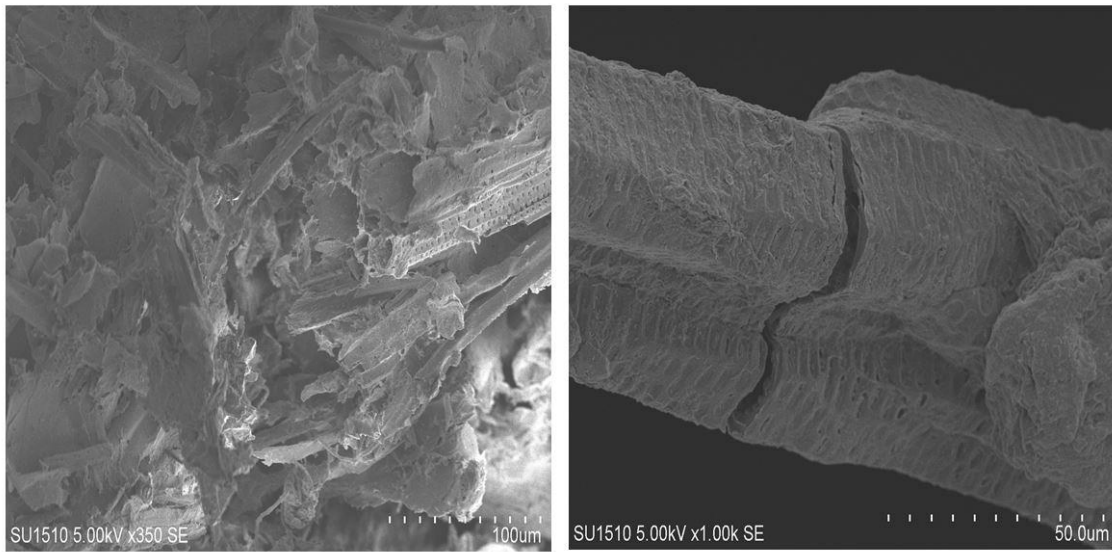
Şekil 6.14'te 120  $^{\circ}\text{C}$ 'de ve 120 dakika termal ön işlem uygulanan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin kırıldığı ve yaklaşık 1-10  $\mu\text{m}$ 'lik çatlakların olduğu görünmektedir. Bu çatlaklar 100  $^{\circ}\text{C}$  ön işlem sonucunda gözlemlenmemiştir. Organik numuneye 120  $^{\circ}\text{C}$ 'de 120 dakikada uygulanan ön işlem sonucunda yüzey kristalitesinin azalmaya başladığı ve çatlaklar oluşturmaya başladığı gözlemlenmiştir.





**Şekil 6.15** 150 °C’de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri

Yukarıdaki şekil 6.15’te 150 °C’de ve 60 dakika termal ön işlem uygulanan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin kırıldığı ve yaklaşık 1-5 µm’lik çatlakların olduğu görülmektedir. 120 °C’de 2 saat uygulanan ön işlem sonucunda bu çatlakların daha büyük (1-10 µm’lik) olduğu ve daha az olduğu görünmüştü. Ön işlem sıcaklığı yükseldikçe bu çatlakların daha sık ve daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle düşük sıcaklıkta uygulanan uzun süre (120 °C ve 120 dakika) yerine yüksek sıcaklık ve daha düşük ön işlem süresi tercih edilebilir. (150 °C ve 60 dakika).



**Şekil 6.16** 180 °C’de termal ön işlem uygulanan organik maddenin SEM görüntüleri

Şekil 6.16'de 180 °C'de ve 60 dakika termal ön işlem uygulanan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin kırılmaların ve azalmaların diğer daha düşük ön işlemlere göre maksimum seviyeye geldiği görülmektedir. Yaklaşık 5 µm eninde ve 100 µm boyunda daha büyük boyutlu çatlaklara rastlanmıştır. 120 °C'de 2 saat uygulanan ön işlem sonucunda bu çatlakların daha büyük (1-10 µm'lik) olduğu ve daha az olduğu görünmüştü. Ön işlem sıcaklığı yükseldikçe bu çatlakların genişliğinin ve sayısının arttığı olduğu açıkça görülmektedir.

### 6.2.3. Alkali ön işlem sonuçları

Farklı miktarlarda uygulanan alkali ön işlem sonucu anaerobik koşullarda biyogaz üretimi sağlanmıştır. Bu süreç sonucunda oluşan biyogaz miktarı, % fazla biyogaz üretimi ve toplam % KOİ giderimi çizelge 6.7'de verilmiştir. Bu çizelgeye göre en yüksek biyogaz üretimi NaOH ön işlemi için katı maddenin % 20'si kadar eklenen alkali miktarı olarak, KOH ön işlemi için katı maddenin % 15'i kadar eklenen alkali miktarı olarak bulunmuştur. Bu reaktörlerde biyogaz üretimi sırasıyla % 59,9 ve % 73,1 olarak bulunmuştur.

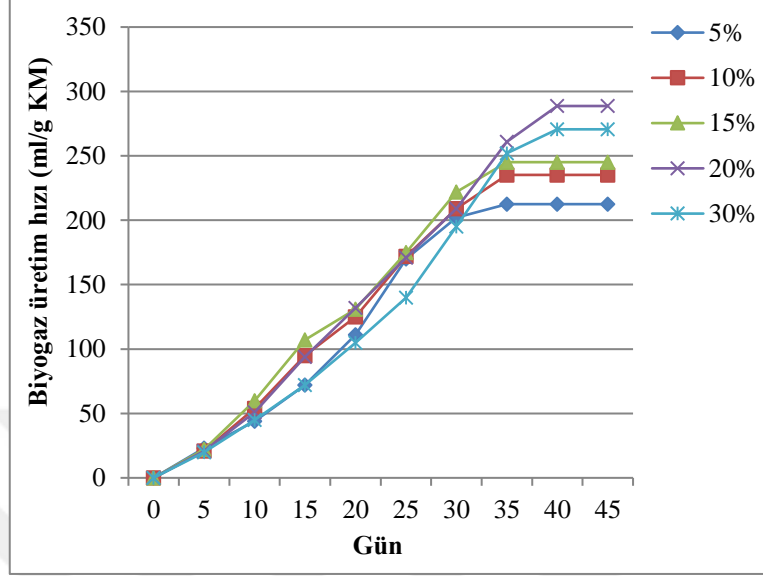
Alkali ön işlem uygulandıktan sonra numunelerin suda çözünürlüğü ön işlemin miktarına göre değişiklik göstermiştir. Genel olarak ön işlem sıcaklığı ve ön işlem şiddeti arttıkça suda çözümlerde artış meydana gelmiştir. En az suda çözünme % 2,9 oranında iken, en fazla suda çözünme % 32,4 oranında gözlemlenmiştir. Biyogaz üretim hızı genellikle suda çözünme ile doğru orantılı olarak artmıştır.

**Çizelge 6.7** Organik atığa uygulanan alkali ön işlem sonuçları

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı ( reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	% Fazla suda çözünme	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
8 N NaOH	5	5,1	R <sub>40</sub>	212,5	17,7	54,0
	10	12,4	R <sub>41</sub>	235,2	30,3	58,1
	15	15,8	R <sub>42</sub>	245,1	35,7	60,5
	20	32,4	R <sub>43</sub>	288,7	59,9	69,0
	30	24,8	R <sub>44</sub>	270,6	49,9	67,7
8 N KOH	5	2,9	R <sub>45</sub>	201,4	11,5	52,0
	10	22,5	R <sub>46</sub>	255,4	41,4	62,2
	15	30,5	R <sub>47</sub>	301,2	66,8	73,1
	20	25,4	R <sub>48</sub>	275,5	52,6	66,9
	30	25,8	R <sub>49</sub>	280,0	55,1	67,5

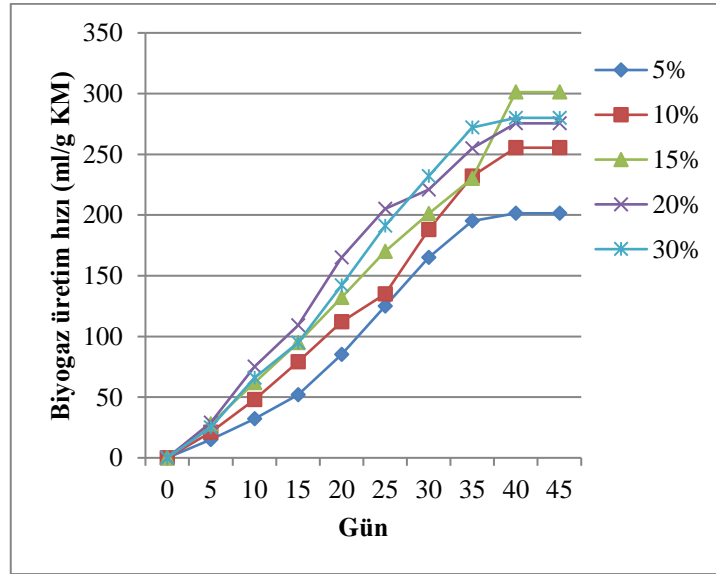
### 6.2.3.1. Alkali ön işlem sonucunda reaktörlere uygulanan anaerobik süreç

Alkali ön işlem uygulanması sonucunda organik maddelerin anaerobik fermantasyon süreci her 5 günde bir hacim ölçümleri ile kontrol edilmiştir.



Şekil 6.17 Farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç

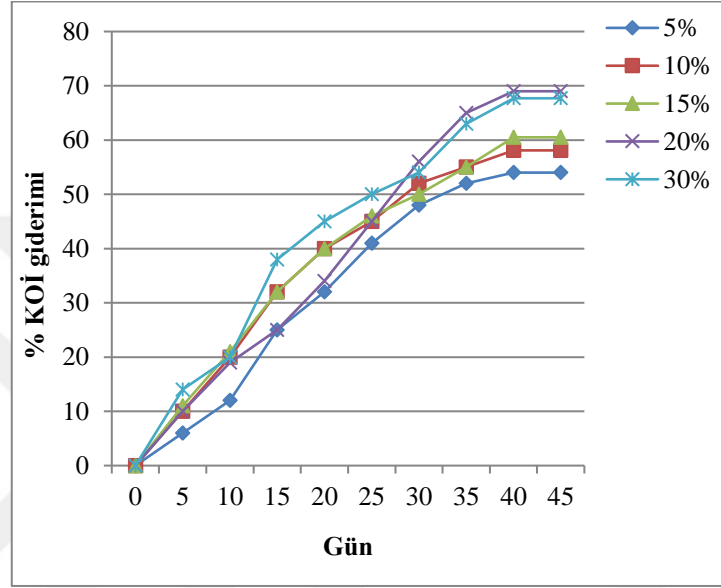
Şekil 6.17’de farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 20 oranında alkali eklenmesi ile 288,7 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile 212,5 ml/g KM oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 6.18 Farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç

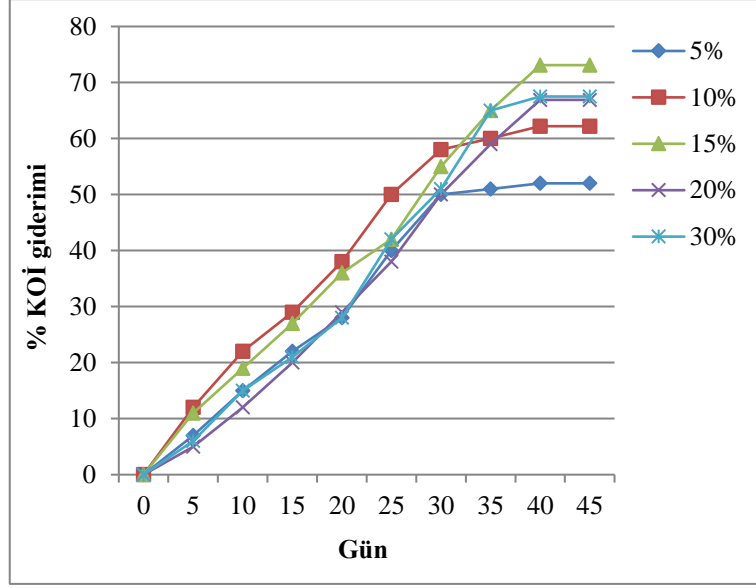
Şekil 6.18’de farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 15 oranında alkali eklenmesi ile 301,2 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile 201,4 ml/g KM değerinde meydana gelmiştir.

### 6.2.3.2. Alkali ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci



Şekil 6.19 Farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi

Şekil 6.19’da farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte oluşan % KOİ giderim verimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlesinin % 20 oranında alkali eklenmesi ile % 69 oranında, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlesinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile % 54 oranında bulunmuştur.



**Şekil 6.20** Farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi

Şekil 6.20’de farklı miktarlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte oluşan % KOİ giderim verimi verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlelerinin % 15 oranında alkali eklenmesi ile % 73,1, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlelerinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile % 52 değerinde meydana gelmiştir.

### 6.2.3.3. Alkali ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi

**Çizelge 6.8** Alkali ön işlem sonucunda biyogaz içerik analizi

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktördeki katı kütlelerinin % miktarı)	Reaktör adı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği (ppm)
8 N NaOH	5	R <sub>40</sub>	62,9	37,0	968
	10	R <sub>41</sub>	63,5	35,5	988
	15	R <sub>42</sub>	61,2	38,5	995
	20	R <sub>43</sub>	64,6	35,1	952
	30	R <sub>44</sub>	65,0	34,6	996
8 N KOH	5	R <sub>45</sub>	65,1	34,8	1015
	10	R <sub>46</sub>	64,9	35,0	1125
	15	R <sub>47</sub>	63,5	36,1	1121
	20	R <sub>48</sub>	64,2	35,2	1052
	30	R <sub>49</sub>	63,2	36,2	1162

Çizelge 6.8’de farklı oranlarda uygulanan alkali ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi yapılmıştır. NaOH ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği hacimce % 66,5 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 62,5 oranında ve KOH ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 64,8 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği

% 61,0 oranında ölçülmüştür. H<sub>2</sub>S içeriği ise en düşük R<sub>43</sub>'te 952 ppm değerinde ve en yüksek ise R<sub>49</sub>'da 1162 ppm değerinde ölçülmüştür. H<sub>2</sub>S içeriği genel olarak NaOH ön işlemlerinde KOH ön işlemlerine göre daha düşük değerlerde ölçülmüştür.

#### 6.2.3.4. Alkali ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim

Çizelge 6.9 Alkali ön işlem sonucunda lignoselülozik bileşenlerdeki değişim

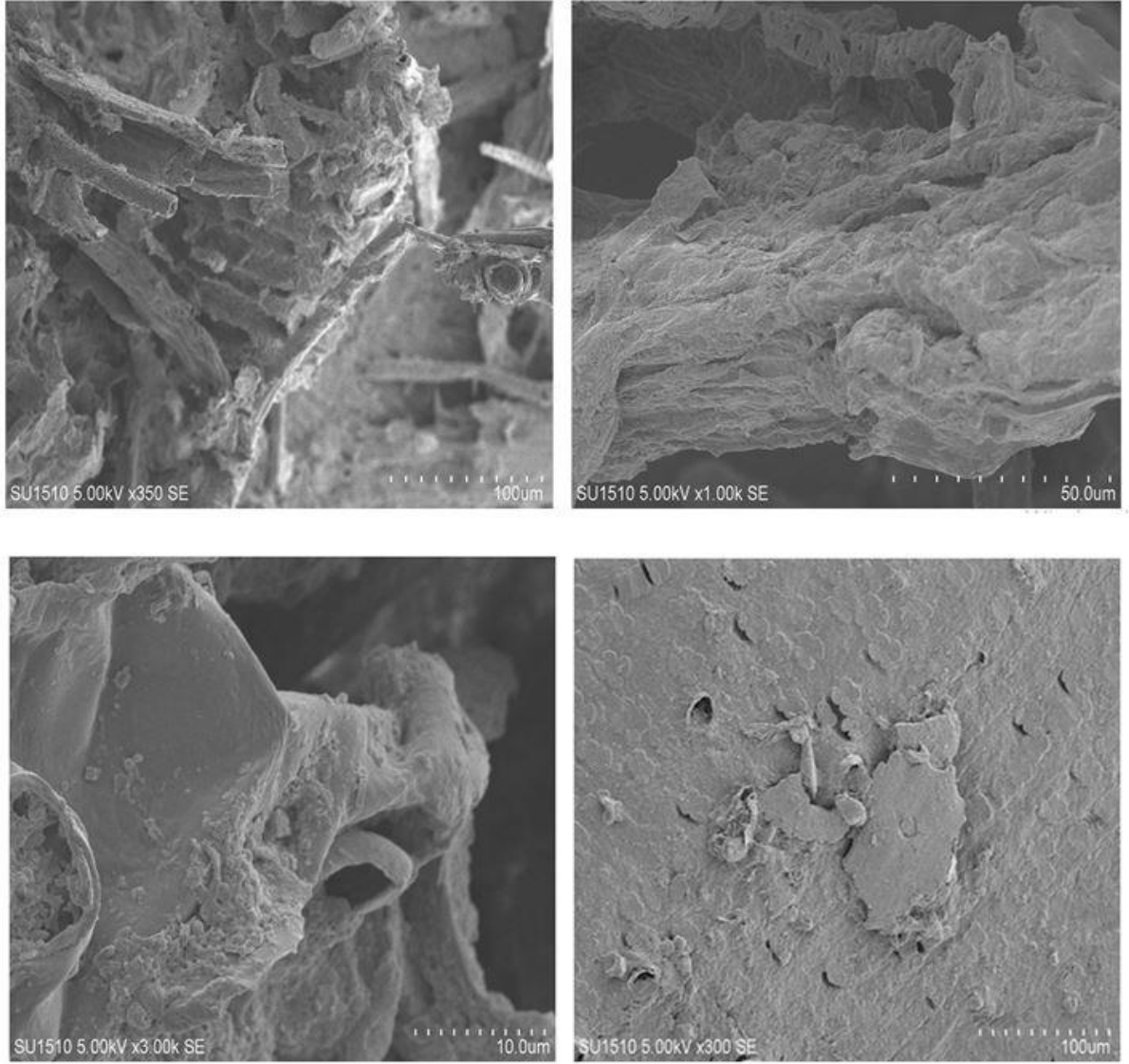
Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	Selüloz çözünmesi (%)	Hemiselüloz çözünmesi (%)	Lignin çözünmesi (%)
8 N NaOH	5	R <sub>40</sub>	7,6	18,9	20,5
	10	R <sub>41</sub>	10,2	27,6	26,9
	15	R <sub>42</sub>	13,1	32,4	27,6
	20	R <sub>43</sub>	15,1	35,2	30,2
	30	R <sub>44</sub>	15,2	37,8	30,3
8 N KOH	5	R <sub>45</sub>	5,2	20,4	20,2
	10	R <sub>46</sub>	12,1	28,9	25,4
	15	R <sub>47</sub>	14,2	36,4	28,5
	20	R <sub>48</sub>	14,3	37,2	28,8
	30	R <sub>49</sub>	14,5	37,4	28,9

Çizelge 6.9'da farklı oranlarda uygulanan alkali ön işlem sonucunda oluşan organik numunenin selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriklerinin suda çözünme yüzdeleri verilmiştir. Alkali ön işlem uygulanan reaktörlerde alkali çözeltilerin miktarına göre lignoselülozik bileşenlerin suda çözünme oranları değişiklik göstermiştir. Reaktör içerisindeki katı madde oranının % 20'si kadar NaOH çözeltisi ile ön işleme maruz bırakılmış reaktörde selüloz çözünmesi % 15,1 oranında olurken % 30'u kadar NaOH eklenen reaktördeki selüloz çözünmesi % 15,2 oranında ölçülmüştür. Bu nedenle ön işlem maliyeti açısından ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar NaOH eklenen reaktör olarak kabul edilmiştir. Aynı durum hemiselüloz ve lignin için geçerli olmuştur. NaOH ön işlem ile hemiselüloz kütleye en fazla % 37,8 ve lignin % 30,3 oranında çözünmüştür.

Reaktör içerisindeki katı madde oranının % 15'i kadar KOH çözeltisi ile ön işleme maruz bırakılmış reaktörde selüloz çözünmesi % 14,2 olurken,% 20'si kadar KOH eklenen reaktördeki selüloz çözünmesi % 14,3 ve % 30'u kadar KOH eklenen reaktördeki selüloz çözünmesi % 14,5 olarak ölçülmüştür. Bu nedenle ön işlem maliyeti açısından ideal reaktör katı kütlesinin % 15'i kadar KOH eklenen reaktör olarak kabul edilmiştir. Hemiselüloz için reaktör içerisindeki katı madde oranının % 15'i kadar KOH çözeltisine

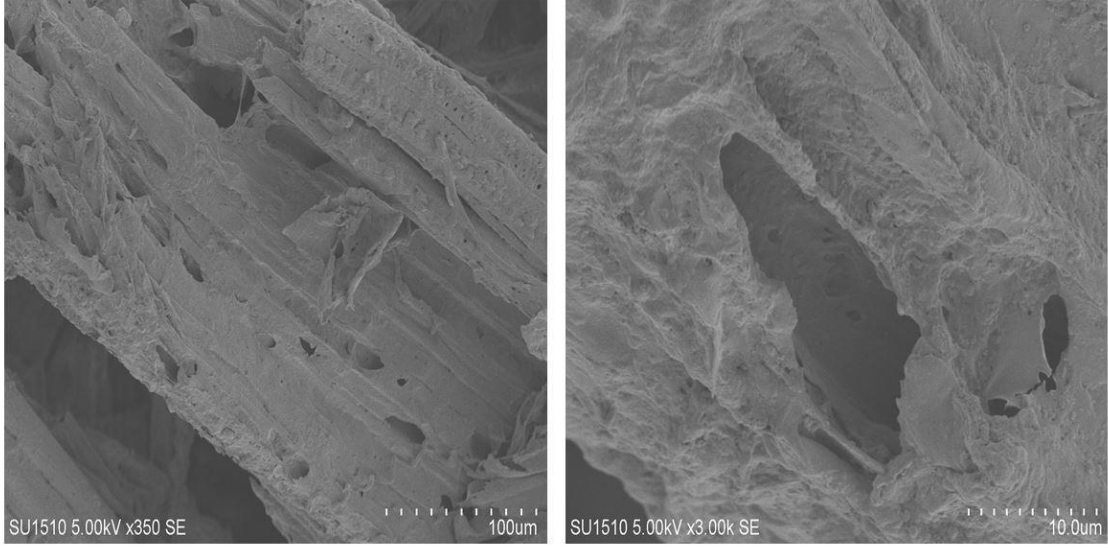
maruz bırakılan reaktörde % 36,4 oranında çözünürken, çözelti miktarlarının artırılması ile bu çözünme en fazla % 37,4 oranında ölçülmüştür. Bu nedenle hemiselüloz çözünmesi içinde ideal reaktör katı oranının % 15'i kadar alkali eklenen reaktör olmuştur. Lignin çözünmesinde de hemiselüloza benzer durum oluşmuştur. KOH ön işlem ile lignin en fazla % 28,9 çözünmüştür.

#### 6.2.3.5. Alkali ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri



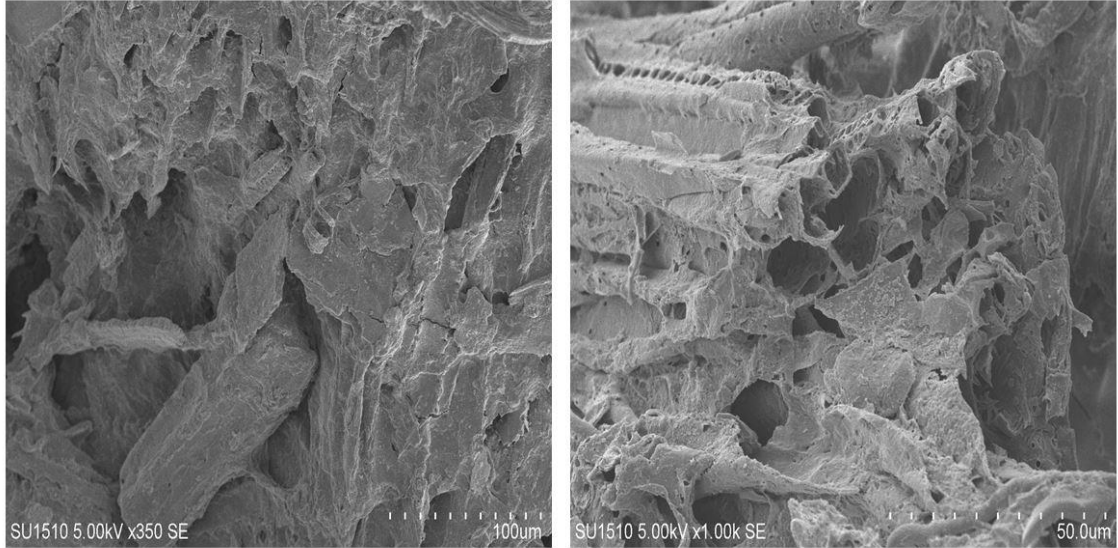
**Şekil 6.21** Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.21’de herhangi bir ön işlem uygulanmayan organik numuneye ait yüzeyin 300, 350, 1000 ve 3000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin olduğu ve yüzey görünümünün genel olarak rijit bir tabakadan meydana geldiği görülmektedir.



**Şekil 6.22** KOH ön işleminin sonucunda oluşan SEM görüntüleri

Şekil 6.22’de KOH ön işleminin sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 3000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin kırılmaya başladığı ve yaklaşık 5-10 µm çaplarında gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. KOH alkali ön işlem sonucunda organik maddenin yüzeyindeki gözenek sayılarının yavaş yavaş arttığı görülmektedir. Selüloz kristalitesinin ise düz rijit yapıdan hafif yumuşak görünümlü bir yapıya geçtiği görülmektedir.



**Şekil 6.23** NaOH ön işleminin sonucunda oluşan SEM görüntüleri

Şekil 6.23’de NaOH ön işleminin sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin azaldığı ve yaklaşık 10-20 µm çaplarında gözeneklerin



açıldığı görünmektedir. NaOH alkali ön işlem sonucunda organik maddenin yüzeyindeki gözenek sayılarının yavaş yavaş arttığı ve selüloz kristalitesinin ise düz rijit yapıdan hafif yumuşak görünümlü gözenekli bir yapıya geçtiği görünmektedir.

#### 6.2.4. Asit ön işlem sonuçları

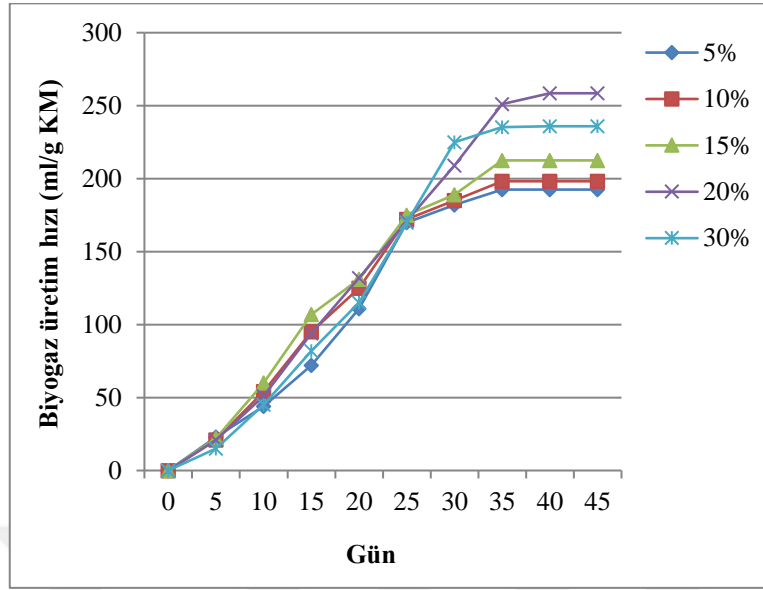
Farklı miktarlarda uygulanan asit ön işlem sonucu anaerobik koşullarda biyogaz üretimi sağlanmıştır. Bu süreç sonucunda oluşan biyogaz miktarı, % fazla biyogaz üretimi ve toplam % KOİ giderimi çizelge 6.10'da verilmiştir. Bu çizelgeye göre en yüksek biyogaz üretimi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> için reaktördeki katı maddenin kütlece % 20' si kadar eklenen asit miktarı olarak, HNO<sub>3</sub> için reaktördeki katı maddenin kütlece % 20' si kadar eklenen asit miktarı olarak bulunmuştur. Bu reaktörlerde sırasıyla % KOİ giderimleri % 66,1 ve % 71,2 oranında bulunmuştur.

Asit ön işlem uygulandıktan sonra numunelerin suda çözünürlüğü ön işlemin miktarına göre değişiklik göstermiştir. Genel olarak asit miktarı arttıkça suda çözünmelerde artış meydana gelmiştir. En az % fazla suda çözünme % 2,1 olarak gerçekleşirken, en fazla % 33 oranında gerçekleşmiştir. Biyogaz üretim hızı genellikle suda çözünme ile doğru orantılı olarak artmıştır.

**Çizelge 6.10** Organik atığa uygulanan asit ön işlem sonuçları

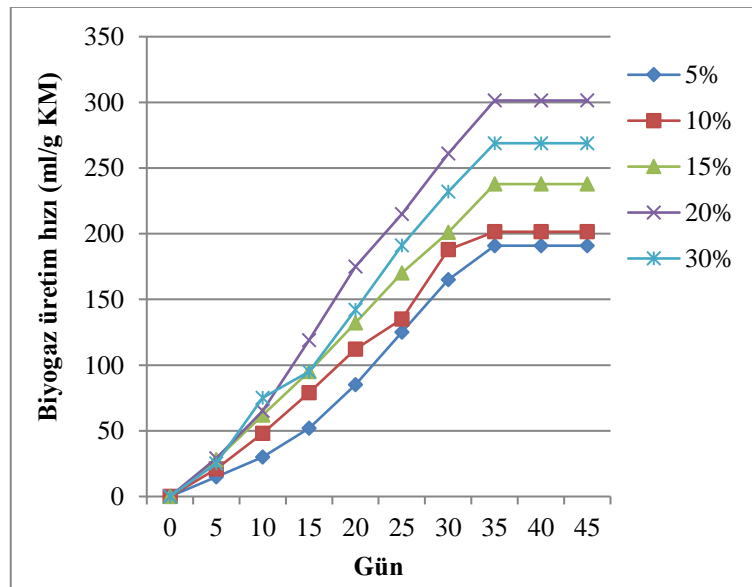
Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	% Fazla suda çözünme	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	2,1	R <sub>50</sub>	192,5	6,6	57,5
	10	3,3	R <sub>51</sub>	198,2	9,8	58,0
	15	10,5	R <sub>52</sub>	212,5	17,7	61,0
	20	26,6	R <sub>53</sub>	258,5	43,2	66,1
	30	19,4	R <sub>54</sub>	235,9	30,6	63,5
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	5	2,5	R <sub>55</sub>	190,9	5,7	55,9
	10	5,6	R <sub>56</sub>	201,5	11,6	59,5
	15	15,8	R <sub>57</sub>	237,8	31,7	64,0
	20	33,5	R <sub>58</sub>	301,4	66,9	71,2
	30	24,5	R <sub>59</sub>	268,9	48,9	68,1

#### 6.2.4.1. Asit ön işlem sonucunda reaktörlere uygulanan anaerobik süreç



Şekil 6.24 Farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltileri eklenmesi sonucunda oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.24'te farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 20 oranında asit eklenmesi ile 258,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında asit eklenmesi ile 192,5 ml/g KM olarak meydana gelmiştir.

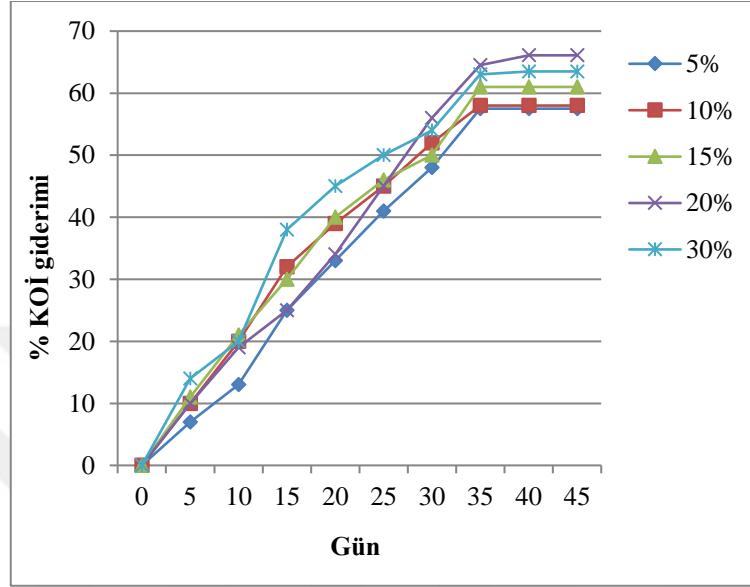


Şekil 6.25 Farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltileri eklenmesi sonucunda oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.25'te farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. En yüksek biyogaz

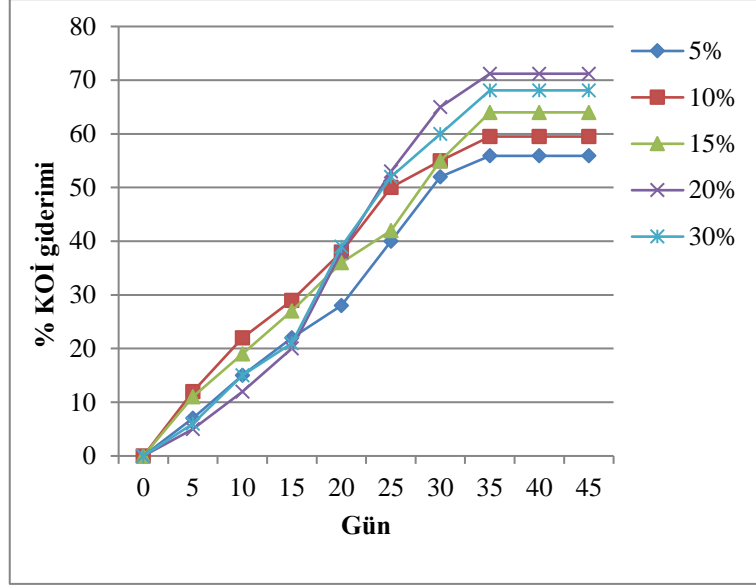
üretimi kuru madde kütlesinin % 20 oranında asit eklenmesi ile 301,4 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5'i kadar asit eklenmesi ile 190,9 ml/g KM olarak meydana gelmiştir.

#### 6.2.4.2 Asidik ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci



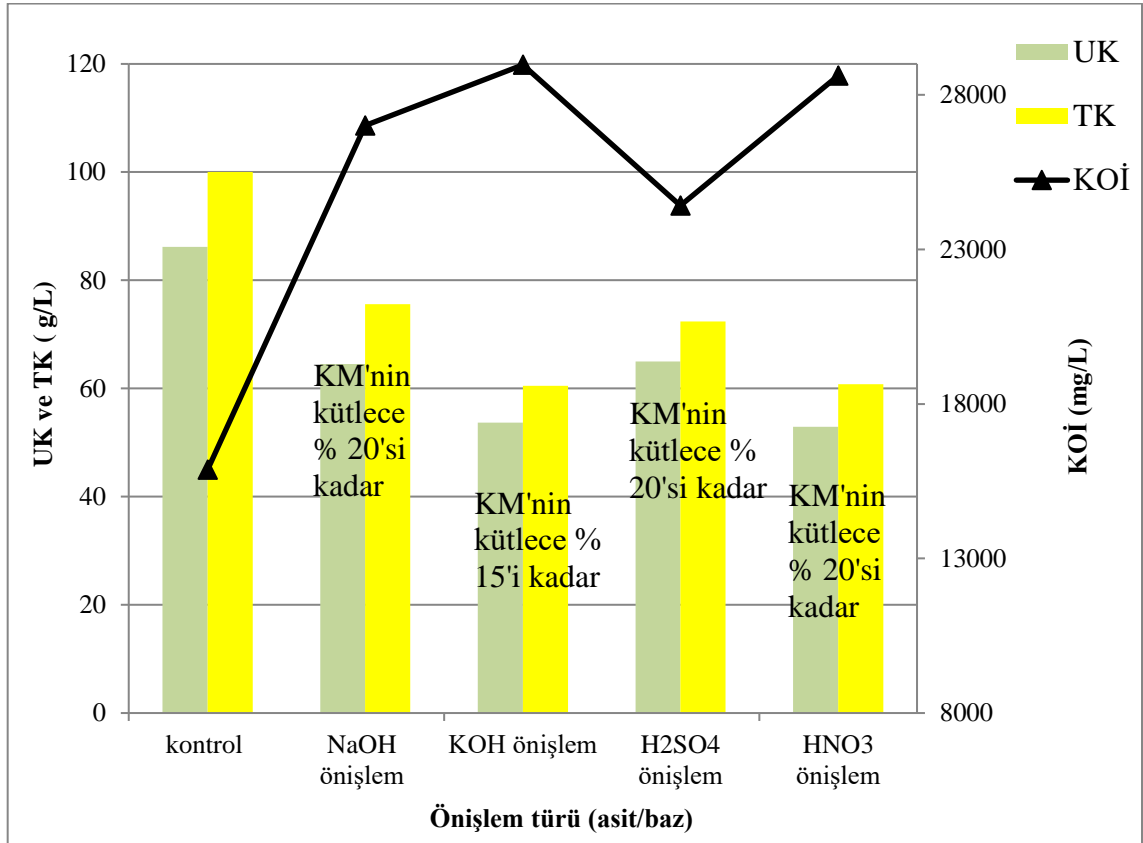
Şekil 6.26 Farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi

Şekil 26'da farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlesinin % 20 oranında asit eklenmesi ile % 66,1 oranında, en düşük % KOİ giderimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında asit eklenmesi ile % 57,5 oranında ölçülmüştür.



**Şekil 6.27** Farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreçte % KOİ giderimi

Şekil 6.27’de farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. % KOİ giderimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlelerinin % 20 oranında asit eklenmesi ile % 71,2 en düşük % KOİ giderimi kuru madde kütlelerinin % 5 oranında asit eklenmesi ile % 55,9 oranında ölçülmüştür.



**Şekil 6.28** Asit-Alkali ön işlem sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim Şekil 6.28’de organik maddeye uygulanan asit ve alkali ön işlem sonucunda optimize edilen ön işlem miktarlarına göre TK, UK ve KOİ miktarları arasındaki ilişki verilmiştir. Başlangıçta organik maddenin KOİ değeri 15870 mg/L iken, KOH ön işlemi sonucunda süzme işleminden sonra toplam KOİ miktarı 28970 mg/L değerine ulaşmıştır. Böylece % 82,5 oranında artmıştır. En az KOİ giderimi ise H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ön işlemi ile 24420 mg/L olarak oluşmuştur. En az KOİ miktarı ise % 53,8 oranında artmıştır. Ön işlemler uygulandıktan sonra TK ile birlikte UK miktarlarında ise azalma gözlemlenmiştir.

#### 6.2.4.3. Asit ön işlem sonucunda anaerobik süreçte toplanan biyogaz analizi

**Çizelge 6.11** Asidik ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği (ppm)
Kütlece % 15’lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	R <sub>50</sub>	63,4	36,4	998
	10	R <sub>51</sub>	61,5	38,2	1125
	15	R <sub>52</sub>	66,2	33,4	1113
	20	R <sub>53</sub>	65,0	34,8	1018
	30	R <sub>54</sub>	62,7	37,1	1125
Kütlece % 15’lik HNO <sub>3</sub>	5	R <sub>55</sub>	61,1	38,7	1065
	10	R <sub>56</sub>	62,8	37,0	1174
	15	R <sub>57</sub>	64,7	35,1	1109
	20	R <sub>58</sub>	63,8	36,1	1158
	30	R <sub>59</sub>	64,2	35,2	1087

Çizelge 6.11’de farklı oranlarda uygulanan asit ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi yapılmıştır. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 66,2, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 61,5 oranında ve HNO<sub>3</sub> ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 64,7 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 61,1 oranında ölçülmüştür. H<sub>2</sub>S içeriği ise en düşük R<sub>50</sub>’de 998 ppm değerinde ve en yüksek R<sub>56</sub>’da 1174 ppm değerinde ölçülmüştür.

#### 6.2.4.4. Asit ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim

Çizelge 6.12 Asit ön işlem sonucunda lignoselülozik bileşenlerdeki değişim

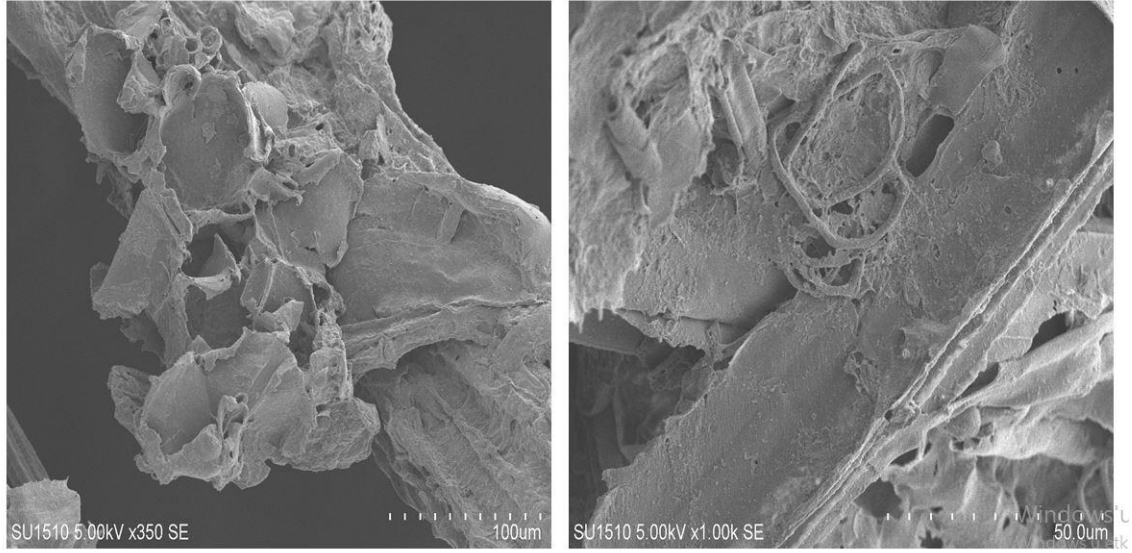
Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	Selüloz çözünmesi (%)	Hemiselüloz çözünmesi (%)	Lignin çözünmesi (%)
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	R <sub>50</sub>	12,1	10,1	9,7
	10	R <sub>51</sub>	14,3	19,2	10,4
	15	R <sub>52</sub>	16,2	20,1	10,9
	20	R <sub>53</sub>	19,3	25,6	11,2
	30	R <sub>54</sub>	19,8	27,8	11,5
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	5	R <sub>55</sub>	12,9	9,8	10,2
	10	R <sub>56</sub>	13,2	12,4	12,1
	15	R <sub>57</sub>	15,4	20,2	13,1
	20	R <sub>58</sub>	19,9	24,3	12,5
	30	R <sub>59</sub>	20,1	24,4	12,8

Çizelge 6.12'de farklı oranlarda uygulanan asit ön işlem sonucunda oluşan organik numuneye ait selüloz, hemiselüloz ve lignin içeriklerinin suda çözünme yüzde oranları verilmiştir. Asit ön işlem uygulanan reaktörlerde asit çözeltilerin miktarına göre lignoselülozik bileşenlerin suda çözünme oranları değişiklik göstermiştir. Reaktör içerisindeki katı madde oranının % 20'si kadar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi ile ön işleme maruz bırakılmış reaktörde selüloz çözünmesi % 19,3 oranında gerçekleşirken % 30'u kadar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenen reaktörde selüloz çözünmesi % 19,8 oranında meydana gelmiştir. Bu nedenle ön işlem maliyeti açısından ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenen reaktör olarak kabul edilmiştir. Hemiselüloz en fazla % 27,8 oranında çözülmüştür. Lignin içeriğinde ise reaktör içindeki katı kütlesinin % 10'u kadar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenen reaktörde %10,4 lignin çözünürken, % 30'u kadar asit eklenen reaktörde ise % 11,5 oranında lignin çözülmüştür. Bu nedenle lignin için ideal reaktör katı kütlesinin % 10'u kadar asit eklenen reaktör olarak tespit edilmiştir.

Reaktör içerisindeki katı madde oranının % 20'si kadar HNO<sub>3</sub> çözeltisi ile ön işleme maruz bırakılmış reaktörde selüloz çözünmesi % 19,9 oranında olurken, % 30'u kadar HNO<sub>3</sub> eklenen reaktörde selüloz çözünmesi % 20,1 oranında gerçekleşmiştir. Bu nedenle ön işlem maliyeti açısından ideal reaktör katı kütlesinin % 20'i kadar HNO<sub>3</sub> eklenen reaktör olarak kabul edilmiştir. Hemiselüloz en fazla % 24,4 oranında çözülmüştür. Bu nedenle hemiselüloz çözünmesi içinde ideal reaktör katı oranının % 20'si kadar asit eklenen reaktör olmuştur. Lignin içeriğinde ise reaktör içindeki katı kütlesinin % 10'u kadar HNO<sub>3</sub> eklenen

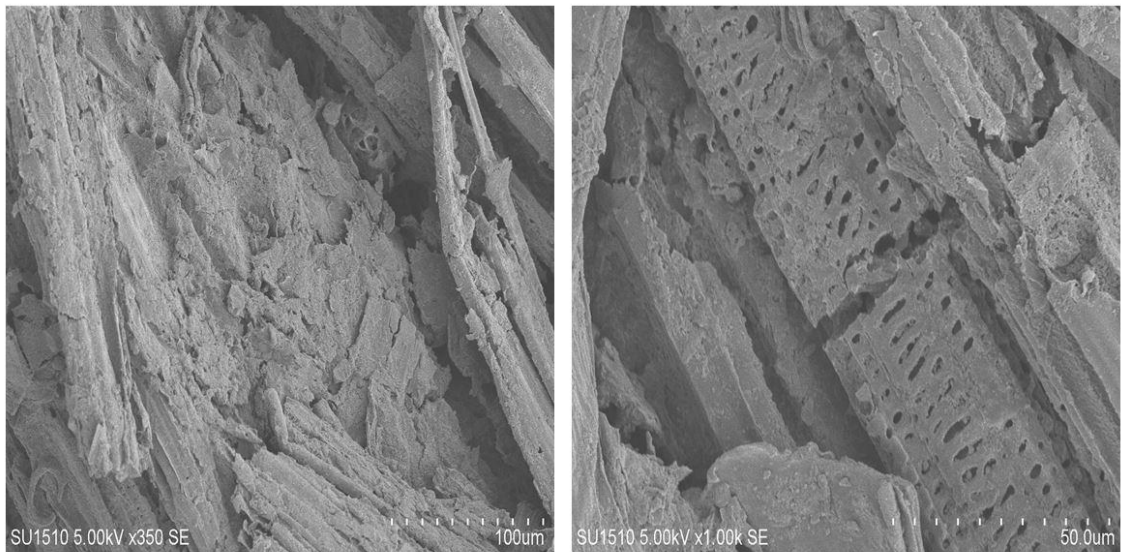
reaktörde % 12,1 oranında çözünürken, % 30'u kadar asit eklenen reaktörde ise % 12,8 oranında çözülmüştür. Bu nedenle lignin için ideal reaktör katı kütlesinin % 10'u kadar HNO<sub>3</sub> eklenen reaktör olarak tespit edilmiştir.

#### 6.2.4.5. Asit ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri



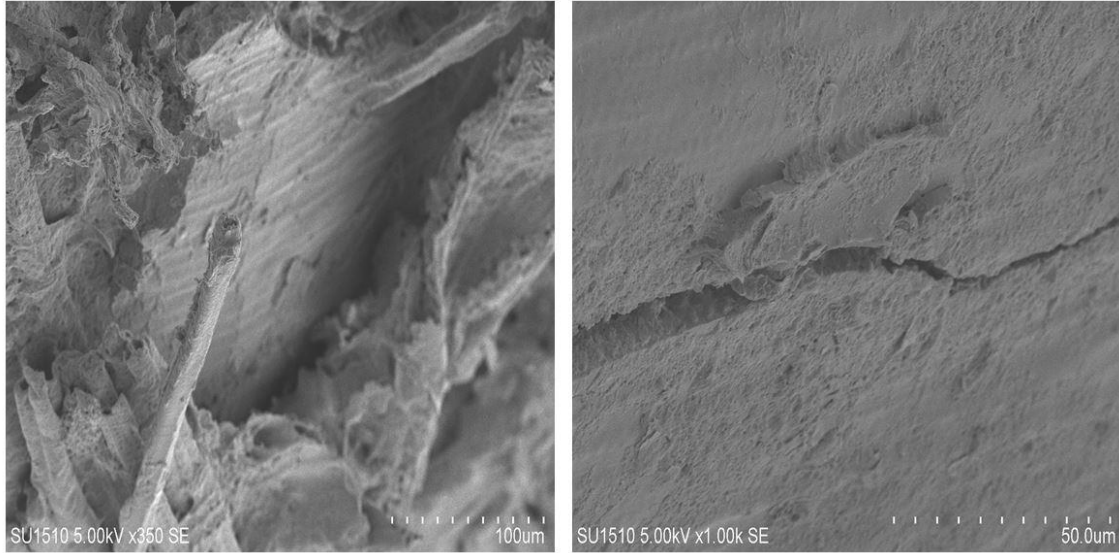
Şekil 6.29 Ön işlemlenmiş organik numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.29'da herhangi bir ön işlem uygulanmayan organik numuneye ait yüzeyin 350 ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin olduğu ve yüzey görünümünün sert bir tabakadan meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.30 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ön işlemi uygulanan numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.30'da  $H_2SO_4$  ön işleminin sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin azaldığı ve yaklaşık 5-10  $\mu m$  boyunda ve 1-5  $\mu m$  eninde gözeneklerin açıldığı görülmektedir.  $H_2SO_4$  ön işleminin sonucunda organik maddenin yüzeyindeki gözenek sayılarının arttığı ve selüloz kristalitesinin ise düz rijit yapıdan hafif yumuşak görünümlü gözenekli bir yapıya geçtiği görülmektedir. Ayrıca kırılmaların ve çatlakların alkali ön işleme göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. 100 °C'de termal ön işlem uygulanan organik numunelerde gözenek yapılarının belirgin olduğu fakat gözeneklerin kapalı olduğu görünmüştür. Fakat  $H_2SO_4$  ön işleminin sonucunda bu gözeneklerin çoğunun açıldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 6.31  $HNO_3$  ön işleminin uygulanan numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.31'de  $HNO_3$  ön işleminin sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin azaldığı ve yaklaşık 5-10  $\mu m$  eninde çatlakların açıldığı görülmektedir. Bu çatlakların muhtemel sebepleri  $HNO_3$  ön işleminin olduğu görülmektedir.  $HNO_3$  ön işleminin sonucunda organik maddenin yüzeyindeki selüloz kristalitesinin ise düz rijit yapıdan hafif yumuşak görünümlü gözenekli bir yapıya geçtiği görülmektedir.



### 6.2.5. Termokimyasal ön işlem sonuçları

Termokimyasal ön işlemler % 15' lik  $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$ , 8N NaOH ve 8N KOH çözeltilerinin organik numunelerin sulu karışımlarına farklı oranlarda eklenip suyun kaynama noktası sıcaklığına getirilene kadar ısıtılması ile uygulanmıştır. Isıtma süresi suyun kaynama noktası sıcaklığına gelindiğinde sabit olarak 30 dakika olarak alınmıştır.

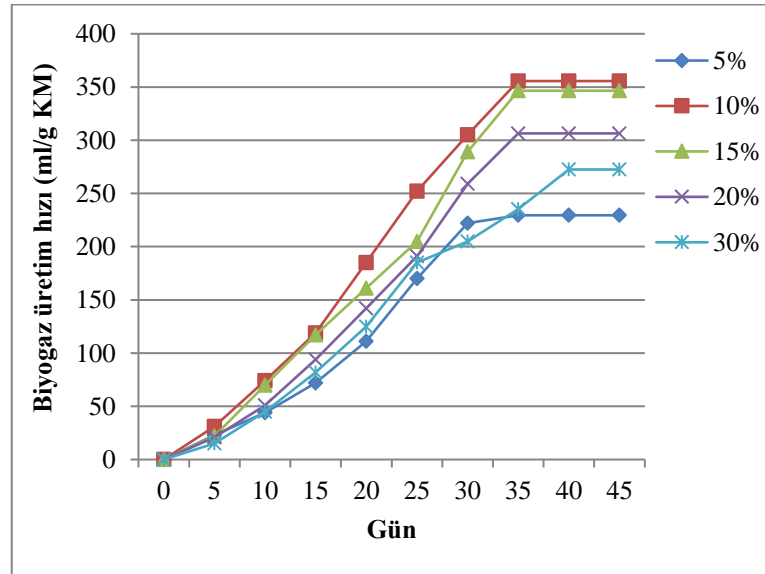
Bu süreç sonucunda oluşan biyogaz miktarı, % fazla biyogaz üretimi ve toplam % KOİ giderimi çizelge 6.13'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre en yüksek biyogaz üretimi  $H_2SO_4$  için katı maddenin % 10'u kadar eklenen asit miktarı olarak,  $HNO_3$  için katı maddenin % 10'u kadar eklenen asit miktarı olarak bulunmuştur. Bu reaktörlerde sırasıyla % fazla biyogaz üretimi % 97,0 ve % 79,1 oranında bulunmuştur. Benzer şekilde NaOH için katı maddenin % 15'i kadar eklenen alkali miktarı olarak,  $HNO_3$  için katı maddenin % 10'u kadar eklenen alkali miktarı olarak bulunmuştur. Bu reaktörlerde sırasıyla % fazla biyogaz üretimi % 120,7 ve % 153,9 oranında meydana gelmiştir.

Sabit sıcaklıkta termokimyasal ön işlem uygulandıktan sonra numunelerin suda çözünürlüğü kimyasal maddenin miktarına bağlı olarak göre değişiklik göstermiştir. Genel olarak asit ve alkali miktarı arttıkça suda çözünmelerde artış meydana gelmiştir. En az % fazla suda çözünme % 12,5 oranında  $R_{60}$ 'ta meydana gelirken, en fazla suda çözünme % 90,5 oranında  $R_{76}$ 'da meydana gelmiştir. Biyogaz üretim hızı genellikle suda çözünme ile doğru orantılı olarak artmıştır.

**Çizelge 6.13** Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan hammaddelerin anaerobik fermentasyon sonuçları

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	% Fazla suda çözünme	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	12,5	R <sub>60</sub>	229,5	27,1	61,1
	10	55,8	R <sub>61</sub>	355,6	97,0	75,4
	15	56,9	R <sub>62</sub>	346,5	91,9	80,9
	20	36,8	R <sub>63</sub>	306,4	69,7	71,2
	30	26,8	R <sub>64</sub>	272,5	50,9	65,6
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	5	12,5	R <sub>65</sub>	223,5	23,8	60,4
	10	40,9	R <sub>66</sub>	323,4	79,1	72,1
	15	40,5	R <sub>67</sub>	301,5	67,0	69,2
	20	50,4	R <sub>68</sub>	322,4	78,6	72,2
	30	35,1	R <sub>69</sub>	288,9	60,0	67,0
8N NaOH	5	15,9	R <sub>70</sub>	240,4	33,1	63,5
	10	60,5	R <sub>71</sub>	381,5	111,3	82,0
	15	70,9	R <sub>72</sub>	398,5	120,7	85,9
	20	55,9	R <sub>73</sub>	355,4	96,8	82,1
	30	25,6	R <sub>74</sub>	255,4	41,4	62,0
8N KOH	5	22,2	R <sub>75</sub>	248,5	37,6	64,5
	10	90,5	R <sub>76</sub>	458,4	153,9	87,1
	15	80,8	R <sub>77</sub>	399,4	121,2	84,7
	20	35,6	R <sub>78</sub>	291,5	61,4	68,1
	30	39,2	R <sub>79</sub>	304,6	68,7	70,1

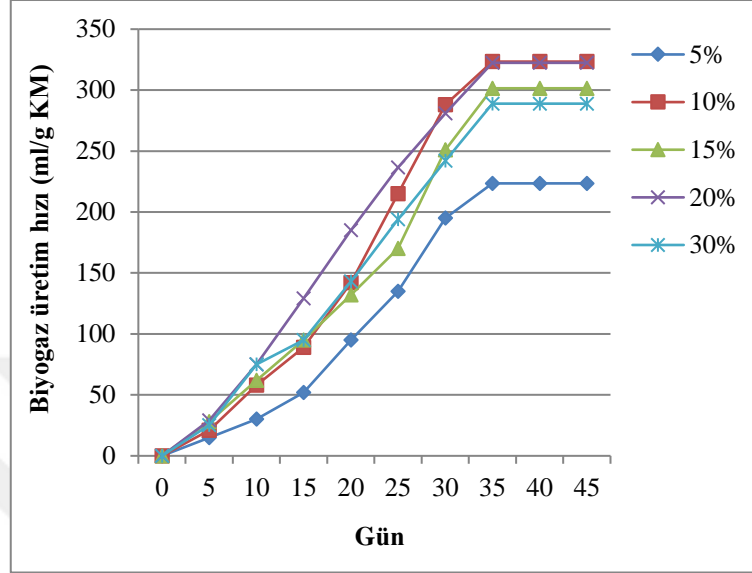
### 6.2.5.1. Termokimyasal ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç



**Şekil 6.32** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç

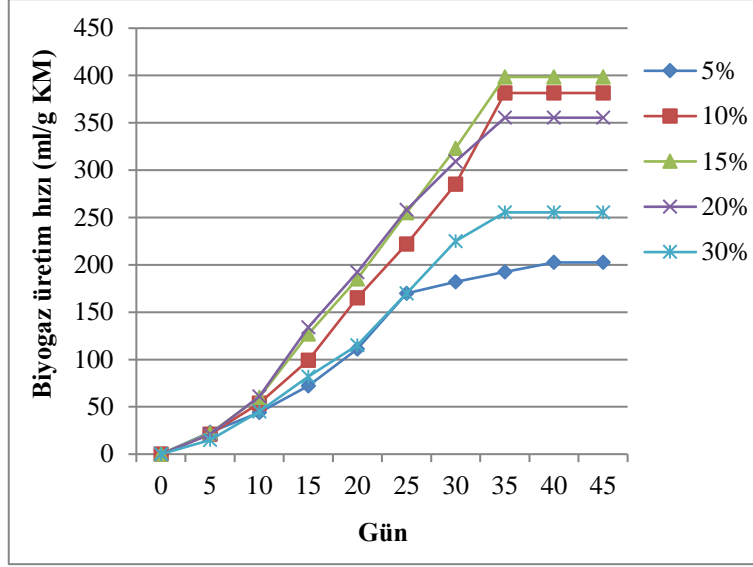
Şekil 6.32'de suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde

devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi reaktör içindeki kuru madde kütlesinin % 10 oranında asit eklenmesi ile 346,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında asit eklenmesi ile 229,5 ml/g KM olarak ölçülmüştür.



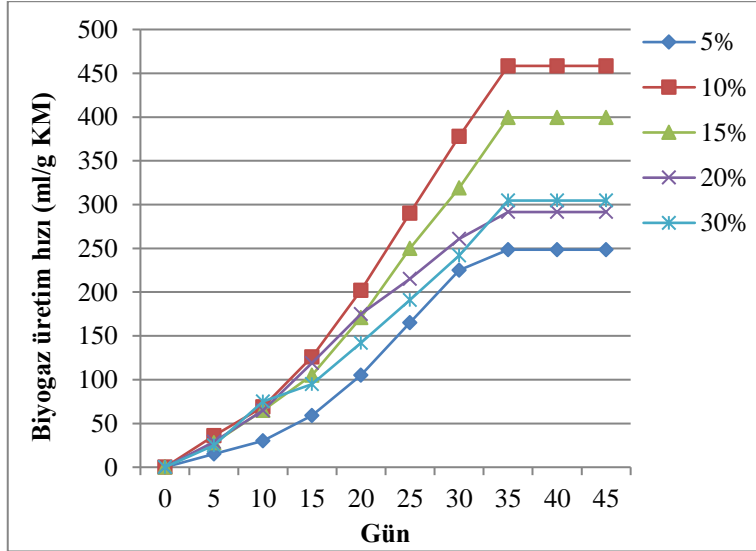
**Şekil 6.33** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.33'te suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 10 oranında asit eklenmesi ile 323,4 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında asit eklenmesi ile 223,5 ml/g KM olarak ölçülmüştür.



**Şekil 6.34** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.34'te suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genellikle artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlelerinin % 15 oranında alkali eklenmesi ile 398,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlelerinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile 202,5 ml/g KM olarak ölçülmüştür.

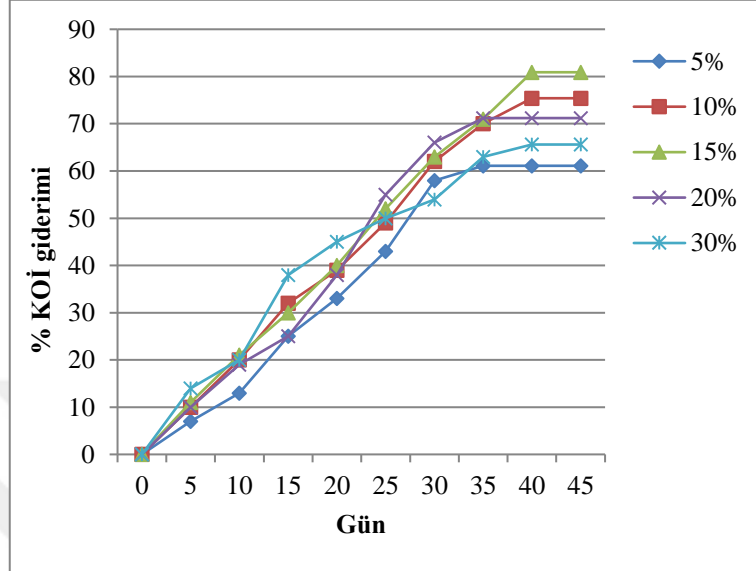


**Şekil 6.35** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH eklenmesi ile oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.35'te suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi kuru madde kütlelerinin % 10

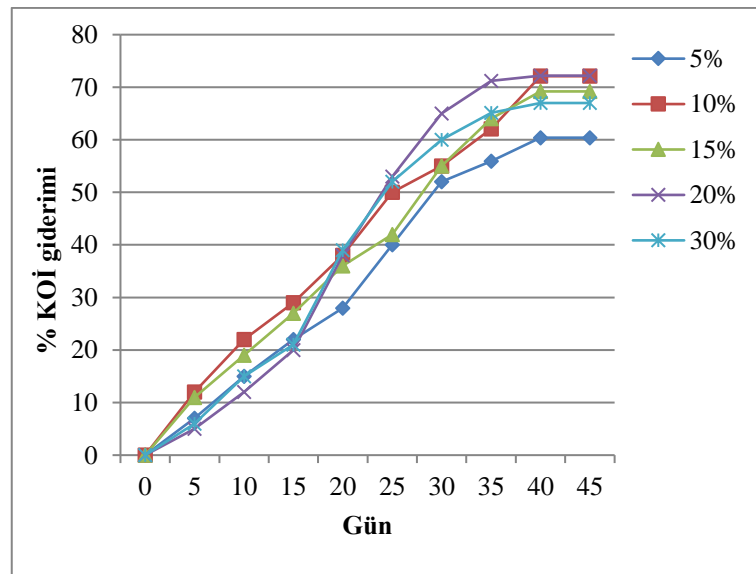
oranında alkali eklenmesi ile 458,4 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi kuru madde kütlesinin % 5 oranında alkali eklenmesi ile 248,5 ml/g KM olarak ölçülmüştür.

### 6.2.5.2. Termokimyasal ön işlem sonucunda KOİ giderim süreci



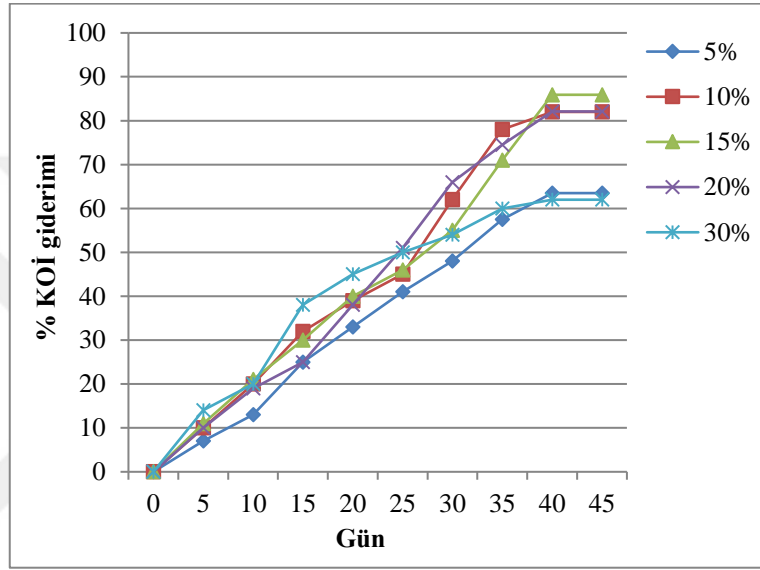
Şekil 6.36 Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci

Şekil 6.36'da suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç boyunca % KOİ giderim verimi gösterilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlesinin % 15 oranında asit eklenmesi ile % 80,9 oranında, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlesinin % 5 oranında asit eklenmesi ile % 61,1 oranında ölçülmüştür.



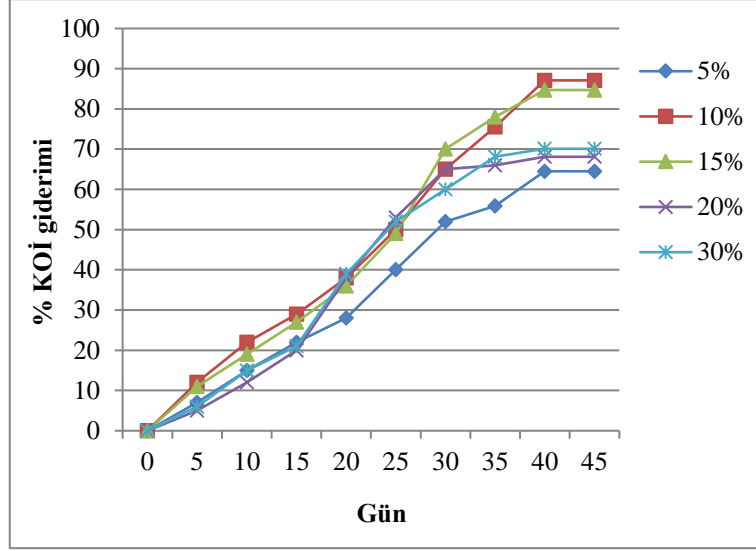
**Şekil 6.37** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci

Şekil 6.37’de suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda HNO<sub>3</sub> çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç boyunca % KOİ giderim verimi gösterilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlelerinin % 20 oranında asit eklenmesi ile % 72,2 oranında, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlelerinin % 5 oranında asit eklenmesi ile % 60,4 oranında gerçekleşmiştir.



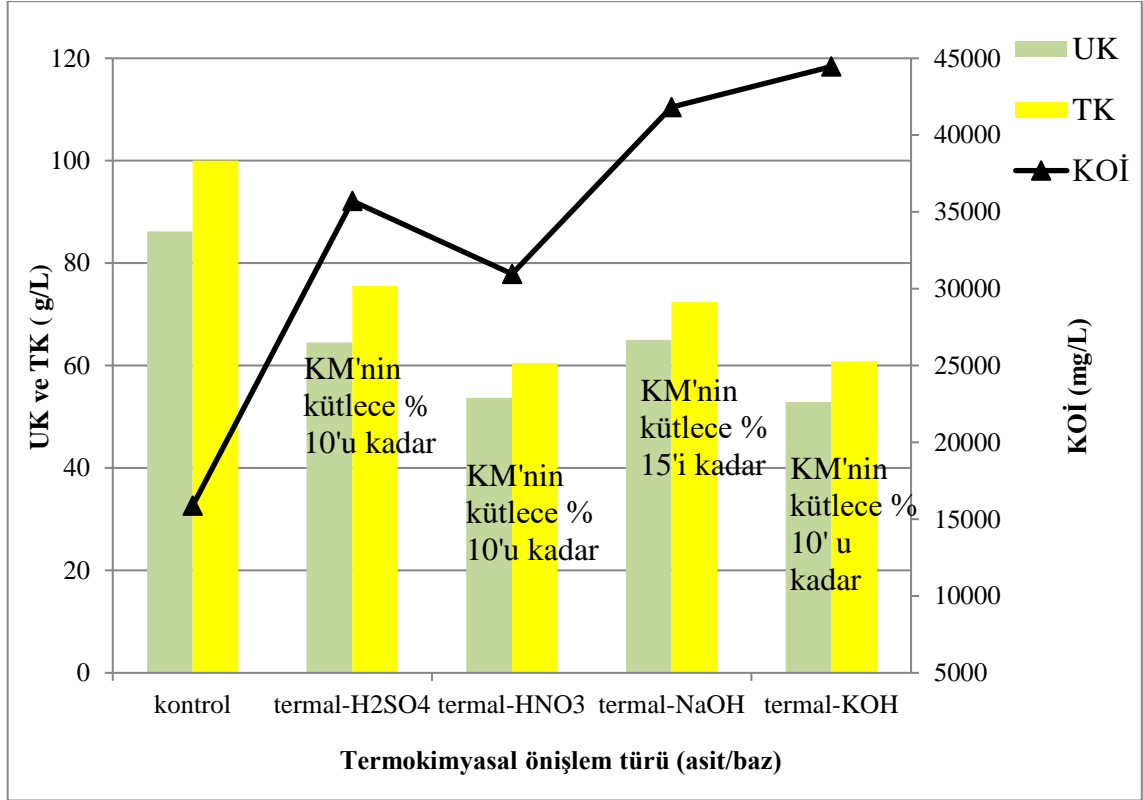
**Şekil 6.38** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci

Şekil 6.38’de suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda NaOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi gösterilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlelerinin % 15 oranında alkali eklenmesi ile % 85,9, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlelerinin % 30 oranında alkali eklenmesi ile % 62,0 oranında ölçülmüştür.



**Şekil 6.39** Suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH eklenmesi ile oluşan % KOİ giderim süreci

Şekil 6.39'da suyun kaynama noktası sıcaklığında farklı oranlarda KOH çözeltisi eklenmesi sonucunda anaerobik süreç boyunca % KOİ giderim verimi gösterilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi kuru madde kütlesinin % 15 oranında alkali eklenmesi ile % 85,9 oranında, en düşük % KOİ giderimi ise kuru madde kütlesinin % 30 oranında alkali eklenmesi ile % 62,0 oranında meydana gelmiştir.



**Şekil 6.40** Termokimyasal ön işleme sonucu organik maddenin TK, UK ve KOİ miktarlarındaki değişim

Şekil 6.40'ta organik maddeye uygulanan asit ve alkali ön işleme sonucunda optimize edilen ön işleme miktarlarına göre TK, UK ve KOİ miktarları arasındaki ilişki verilmiştir. Başlangıçta organik maddenin KOİ değeri 15870 mg/L iken, termal KOH ön işleme sonucunda süzme işleminden sonra toplam KOİ miktarı 44458 mg/L değerine ulaşmıştır. Böylece KOİ değeri % 180 oranında artış göstermiştir. En az KOİ giderimi ise termal HNO<sub>3</sub> ön işleme ile 30970 mg/L değerine ulaşmıştır. En az KOİ miktarı ise % 95,1 oranında artmıştır. Ön işlemler uygulandıktan sonra TK ile birlikte UK miktarında azalmıştır.



### 6.2.5.3. Termokimyasal ön işlem sonucunda toplanan biyogaz analizi

**Çizelge 6.14** Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan hammaddeden oluşan biyogaz analizi

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı (reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği (ppm)
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	R <sub>60</sub>	62,4	37,4	1135
	10	R <sub>61</sub>	58,5	41,1	1152
	15	R <sub>62</sub>	56,9	36,9	1258
	20	R <sub>63</sub>	60,0	39,6	1325
	30	R <sub>64</sub>	62,5	37,1	1322
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	5	R <sub>65</sub>	63,5	36,1	1152
	10	R <sub>66</sub>	62,5	37,2	1065
	15	R <sub>67</sub>	59,8	40,0	1265
	20	R <sub>68</sub>	58,9	40,9	1352
	30	R <sub>69</sub>	59,9	39,8	1312
8 N NaOH	5	R <sub>70</sub>	60,5	39,2	1125
	10	R <sub>71</sub>	61,2	38,5	1052
	15	R <sub>72</sub>	63,5	36,1	1065
	20	R <sub>73</sub>	63,2	36,5	1032
	30	R <sub>74</sub>	58,5	41,2	1085
8 N KOH	5	R <sub>75</sub>	57,5	42,0	1135
	10	R <sub>76</sub>	58,6	41,0	1235
	15	R <sub>77</sub>	60,5	39,0	1365
	20	R <sub>78</sub>	62,5	37,2	1295
	30	R <sub>79</sub>	59,8	40,0	1253

Çizelge 6.14'te farklı oranlarda uygulanan termokimyasal ön işlem sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi yapılmıştır. Suyun kaynama noktası sıcaklığında H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 62,5, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 56,9 olarak, HNO<sub>3</sub> ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 63,5, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 58,9 olarak ölçülmüştür. Asit-termal ön işlemler sonucunda H<sub>2</sub>S içeriği en düşük R<sub>60</sub>'ta 1065 ppm değerinde ve en yüksek R<sub>68</sub>'de 1352 ppm değerinde ölçülmüştür.

Suyun kaynama noktası sıcaklığında NaOH ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 63,5, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 58,5 olarak, KOH ön işlemi uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 62,5 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 57,5 oranında ölçülmüştür. Alkali-termal ön işlemler sonucunda H<sub>2</sub>S içeriği en düşük R<sub>73</sub>'te 1032 ppm değerinde ve en yüksek R<sub>77</sub>'de 1365 ppm değerinde ölçülmüştür.

#### 6.2.5.4. Termokimyasal ön işlem sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim

**Çizelge 6.15** Suyun kaynama noktası sıcaklığında termokimyasal ön işlem uygulanan hammaddenin lignoselülozik bileşenlerdeki değişim

Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı ( reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	Selüloz çözünmesi (%)	Hemiselüloz çözünmesi (%)	Lignin çözünmesi (%)
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5	R <sub>60</sub>	18,4	10,5	10,2
	10	R <sub>61</sub>	19,5	19,7	22,4
	15	R <sub>62</sub>	22,3	25,2	32,5
	20	R <sub>63</sub>	27,4	30,2	37,4
	30	R <sub>64</sub>	27,7	30,5	37,6
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	5	R <sub>65</sub>	7,8	11,6	12,5
	10	R <sub>66</sub>	15,6	20,5	22,2
	15	R <sub>67</sub>	21,2	25,4	37,6
	20	R <sub>68</sub>	26,5	31,4	39,5
	30	R <sub>69</sub>	26,8	31,9	39,8
8 N NaOH	5	R <sub>70</sub>	32,4	27,6	30,4
	10	R <sub>71</sub>	35,6	28,5	32,5
	15	R <sub>72</sub>	37,8	34,6	35,6
	20	R <sub>73</sub>	38,8	35,9	45,9
	30	R <sub>74</sub>	38,9	35,7	45,7
8 N KOH	5	R <sub>75</sub>	30,4	25,6	32,6
	10	R <sub>76</sub>	32,4	28,6	33,5
	15	R <sub>77</sub>	31,8	33,5	35,6
	20	R <sub>78</sub>	32,9	34,4	46,7
	30	R <sub>79</sub>	34,5	35,5	46,8

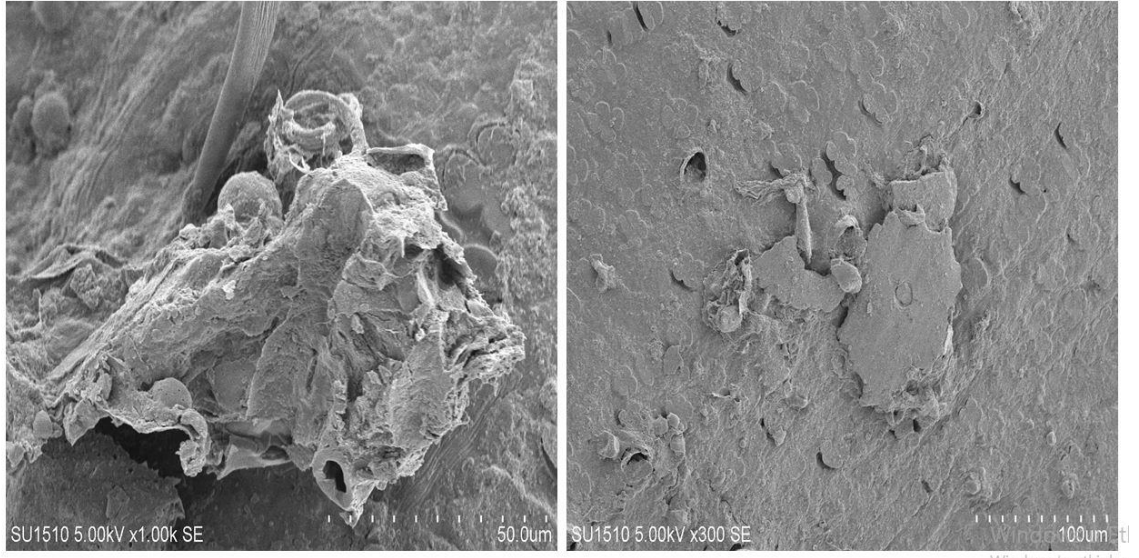
Çizelge 6.15'te farklı oranlarda uygulanan termokimyasal ön işlem sonucunda oluşan organik numuneye ait selüloz, hemiselüloz ve ligninin suda çözünme yüzdeleri belirtilmiştir. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asidi ile termokimyasal ön işlem sonucunda reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar eklenen asit miktarı sonucunda selülozun % 27,4 oranında çözünürken % 30'u kadar asit miktarı ön işlemi sonucunda % 27,7 oranında çözülmüştür. Bu nedenle selüloz için ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Hemiselüloz ve lignin içinde aynı durum söz konusudur. Hemiselüloz en fazla % 30,5 ve lignin en fazla % 37,6 oranında çözülmüştür.

HNO<sub>3</sub> asidi ile termokimyasal ön işlem sonucunda reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar eklenen asit miktarı sonucunda selülozun % 26,5'ü çözünürken % 30'u kadar asit miktarı ön işlemi sonucunda % 26,8 oranında çözülmüştür. Bu nedenle selüloz için ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar HNO<sub>3</sub> eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Hemiselüloz ve lignin içinde aynı durum söz konusudur. Hemiselüloz en fazla % 31,9 ve lignin en fazla % 39,8 oranında çözülmüştür.

NaOH ile termokimyasal ön işlem sonucunda reaktördeki katı kütlesinin % 10'u kadar eklenen alkali miktarı sonucunda selülozun % 35,6'sı çözünürken % 30'u kadar alkali miktarı ön işlemi sonucunda % 38,9 oranında çözünmüştür. Bu nedenle selüloz için ideal reaktör katı kütlesinin % 10'u kadar NaOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Hemiselüloz için katı kütlesinin % 15'i kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 34,6 çözünme sağlanırken, katı kütlesinin % 30'u kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 35,7 oranında çözünme sağlanmıştır. Bu nedenle hemiselüloz çözünmesi için ideal reaktör katı kütlesinin % 15'i kadar NaOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Lignin için reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 45,9 oranında çözünürken, % 30'u kadar alkali miktarı ön işlemi sonucunda % 45,7 oranında çözünmüştür. Bu nedenle lignin çözünmesi için ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar NaOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir.

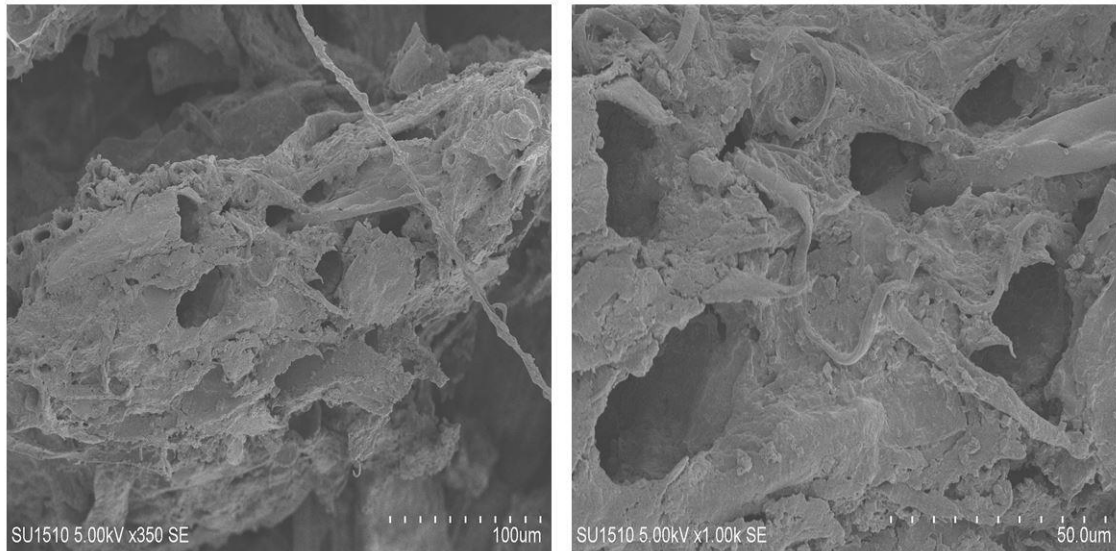
KOH ile termokimyasal ön işlem sonucunda reaktördeki katı kütlesinin % 5'i kadar eklenen alkali miktarı sonucunda selülozun % 30,4'ü çözünürken % 30'u kadar alkali miktarı ön işlemi sonucunda % 34,5 oranında çözünmüştür. Bu nedenle çözünme değerleri birbirine yakın olduğundan selüloz için ideal reaktör, ön işlem maliyeti açısından değerlendirildiğinde katı kütlesinin % 5'i kadar KOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Hemiselüloz için katı kütlesinin % 15'i kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 33,5 oranında çözünme sağlanırken, katı kütlesinin % 30'u kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 35,5 oranında çözünme sağlanmıştır. Bu nedenle hemiselüloz çözünmesi için ideal reaktör katı kütlesinin % 15'i kadar KOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir. Lignin için reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar eklenen alkali miktarı sonucunda % 46,7 oranında çözünürken, % 30'u kadar alkali miktarı ön işlemi sonucunda % 46,8 oranında çözünmüştür. Bu nedenle lignin çözünmesi için ideal reaktör katı kütlesinin % 20'si kadar KOH eklenen reaktör olarak belirlenmiştir.

### 6.2.5.5. Termokimyasal ön işlem sonucunda organik atığın SEM görüntüleri



Şekil 6.41 Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri

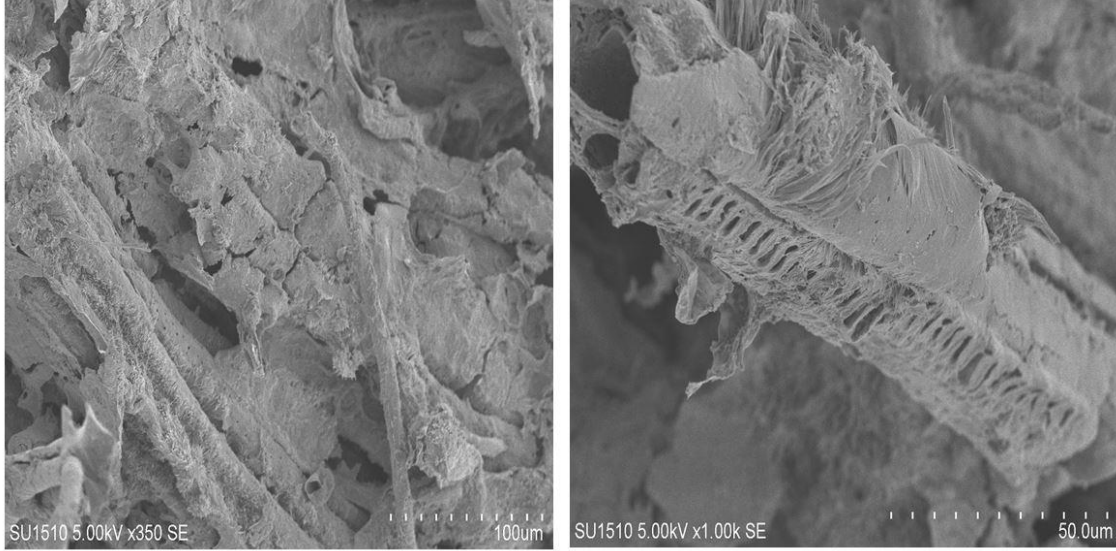
Şekil 6.41’de herhangi bir ön işlem uygulanmayan organik numuneye ait yüzeyin 1000 ve 300 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin olduğu ve yüzey görünümünün sert bir tabakadan meydana geldiği görülmektedir. Aynı zamanda herhangi bir gözenek yapısının, kırılmaların ve çatlakların olmadığı görülmektedir.



Şekil 6.42 KOH-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri

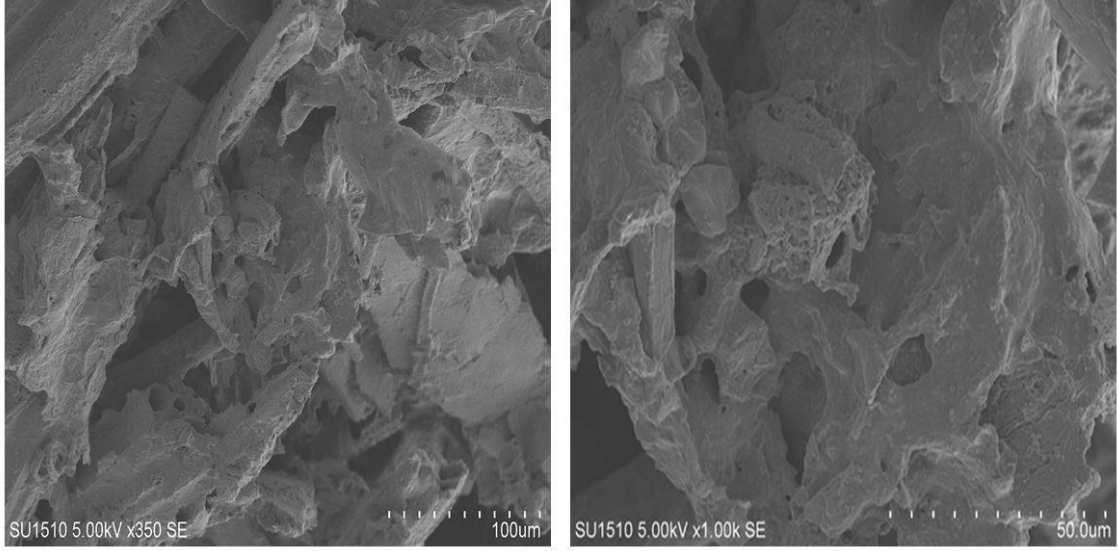
Şekil 6.42’de KOH termal ön işlemi sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin azaldığı ve yaklaşık 5-30 µm eninde dairesel

görünümlü büyük gözeneklerin oluştuğu görünmektedir. Bu gözenek boyutlarının diğer ön işlemlerden farklı olduğu ve daha büyük boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu büyük yapıda oluşan gözeneklerin muhtemel sebepleri arasında termokimyasal (KOH termal) ön işlemi bulunmaktadır.



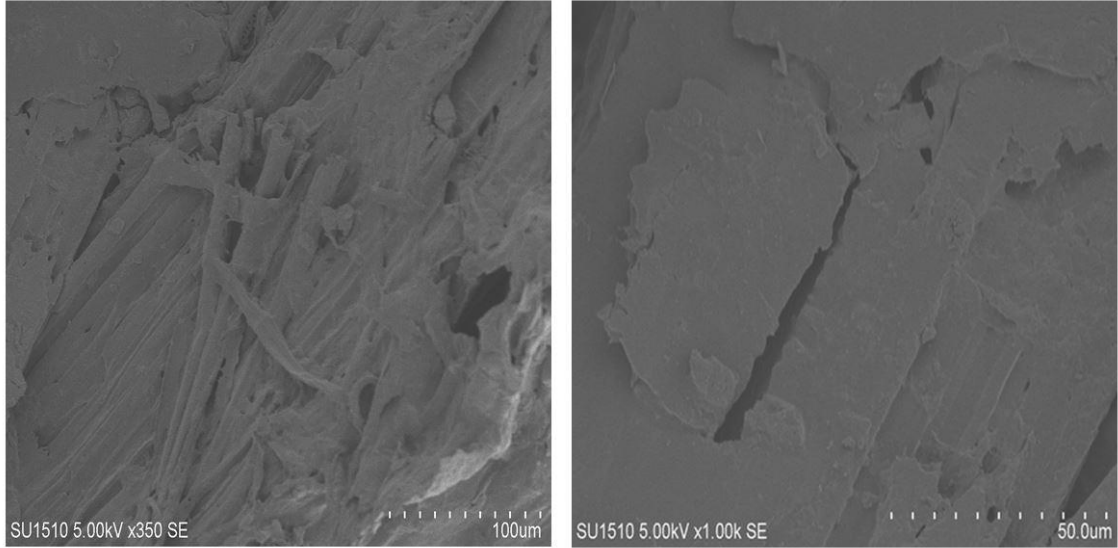
**Şekil 6.43** NaOH-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.43'te NaOH termal ön işlemi sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey kristalitesinin azaldığı ve yaklaşık 1-5 µm boyutlarında yüzey çatlaklarının olduğu görünmektedir. Bu çatlakların muhtemel sebepleri arasında termokimyasal ön işlem (NaOH-termal) bulunmaktadır. 1000 kat büyütülmüş yüzeye bakacak olursak lignoselülozik bir parçanın yüzey görüntüsünde küçük boyutlarda (1-5 µm) gözeneklerin açıldığı görünmektedir. 100 °C'de ön işlem uygulanan görüntüde kapalı olan gözenekler termokimyasal ön işlem (100 °C'de 1 saat ve NaOH ön işlem) sonucunda açılmıştır.



**Şekil 6.44** H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.44'te H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> termal ön işlem sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey sertliğinin azaldığı ve alkali termal ön işleme benzer gözeneklere rastlanmamıştır. Fakat daha ince ve yumuşak bir yüzey görüntüsü oluşmuştur.



**Şekil 6.45** HNO<sub>3</sub>-termal ön işlem uygulanan organik numunenin SEM görüntüleri

Şekil 6.45'te HNO<sub>3</sub> termal ön işlem sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey sertliğinin azaldığı ve lignoselülozik bileşenin yaklaşık 1-5 µm genişliğinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. Bu çatlakların muhtemel sebepleri arasında HNO<sub>3</sub> termal ön işlem uygulanması vardır.

### 6.2.6. Ultrases dalgası ön işlemleri sonuçları

**Çizelge 6.16** Ultrases dalga ön işlemleri uygulanan organik maddenin anaerobik fermantasyon sonuçları

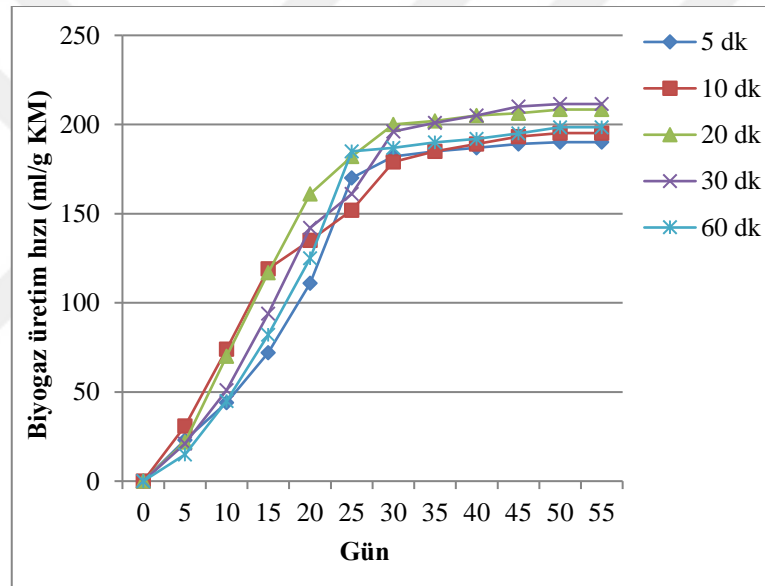
Ultrases dalga şiddeti (kj)	Ultrases dalga süresi (dk)	% Fazla suda çözünme	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
5	5	2,1	R <sub>80</sub>	190,1	5,3	55,0
	10	3,4	R <sub>81</sub>	195,2	8,1	56,0
	20	6,5	R <sub>82</sub>	208,4	15,4	58,5
	30	7,1	R <sub>83</sub>	211,5	17,1	59,0
	60	4,0	R <sub>84</sub>	198,5	9,9	57,5
10	5	4,1	R <sub>85</sub>	198,5	9,9	54,1
	10	4,8	R <sub>86</sub>	201,5	11,6	58,0
	20	3,2	R <sub>87</sub>	196,9	9,0	56,5
	30	6,1	R <sub>88</sub>	208,5	15,5	57,6
	60	8,3	R <sub>89</sub>	212,4	17,6	59,1
20	5	8,1	R <sub>90</sub>	212,2	17,5	59,1
	10	8,2	R <sub>91</sub>	215,4	19,3	60,2
	20	9,5	R <sub>92</sub>	222,5	23,2	62,1
	30	7,5	R <sub>93</sub>	214,3	18,7	59,5
	60	6,4	R <sub>94</sub>	209,5	16,0	58,5
30	5	12,5	R <sub>95</sub>	241,4	33,7	61,5
	10	15,1	R <sub>96</sub>	258,5	43,2	65,6
	20	14,5	R <sub>97</sub>	275,4	52,5	68,9
	30	12,4	R <sub>98</sub>	262,5	45,4	66,6
	60	11,4	R <sub>99</sub>	258,4	43,1	64,9
50	5	8,9	R <sub>100</sub>	222,2	23,1	62,0
	10	9,5	R <sub>101</sub>	232,4	28,7	63,1
	20	12,1	R <sub>102</sub>	233,3	33,5	64,0
	30	12,3	R <sub>103</sub>	235,9	30,6	63,2
	60	11,1	R <sub>104</sub>	233,5	29,3	61,0
100	5	10,5	R <sub>105</sub>	235,4	30,4	65,2
	10	9,8	R <sub>106</sub>	242,6	34,4	66,5
	20	13,1	R <sub>107</sub>	270,6	49,9	67,0
	30	12,5	R <sub>108</sub>	255,6	41,6	64,6
	60	11,0	R <sub>109</sub>	241,5	33,7	62,9

Çizelge 6.16'da organik numuneye farklı şiddetlerde ve farklı zaman aralıklarında uygulanan ultrases dalga ön işlemleri sonucunda biyogaz üretim hızı, % fazla biyogaz üretimi ve % KOİ giderimi verilmiştir. Ultrases dalga şiddeti 20, 30, 50 ve 100 kj ultrases dalga frekansında uygulanan ultrases dalgaları için en fazla biyogaz üretimi ultrases dalgasının 20 dakika boyunca uygulanması sonucu gerçekleşmiştir. Fakat 5 kj ve 10 kj ultrases dalga şiddeti ön işlemleri süresinin sırasıyla 30 ve 60 dakika olduğu reaktörlerde biyogaz üretimi maksimum verimli olmuştur. Yapılan çalışma sonucunda 20 kj ultrases dalgasının altındaki çalışmalarda ön işlemleri süresinin 20 dakikadan daha fazla uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Farklı zaman aralıklarında ve şiddetlerinde uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri

sonucunda anaerobik süreçten sonra en fazla biyogaz üretimi 275,4 ml/g KM olarak 30 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörde (25 W) meydana gelmiştir. Bu reaktörde % 52,5 daha fazla biyogaz üretimi ve KOİ giderimi ise % 68,9 oranında meydana gelmiştir.

Ultrases dalgası ön işlemi uygulandıktan sonra numunelerin suda çözünürlüğü ultrases dalga şiddetine ve maruz kalma süresine bağlı olarak göre değişiklik göstermiştir. Genel olarak ultrases dalga şiddeti ve maruz kalma süresi arttıkça suda çözümlerde artış meydana gelmiştir. En az % fazla suda çözünme % 2,1 olarak R<sub>80</sub> 'de meydana gelirken, en fazla % 15,1 oranında R<sub>96</sub> 'da meydana gelmiştir. Biyogaz üretim hızı genellikle suda çözünme ile doğru orantılı olarak artmıştır.

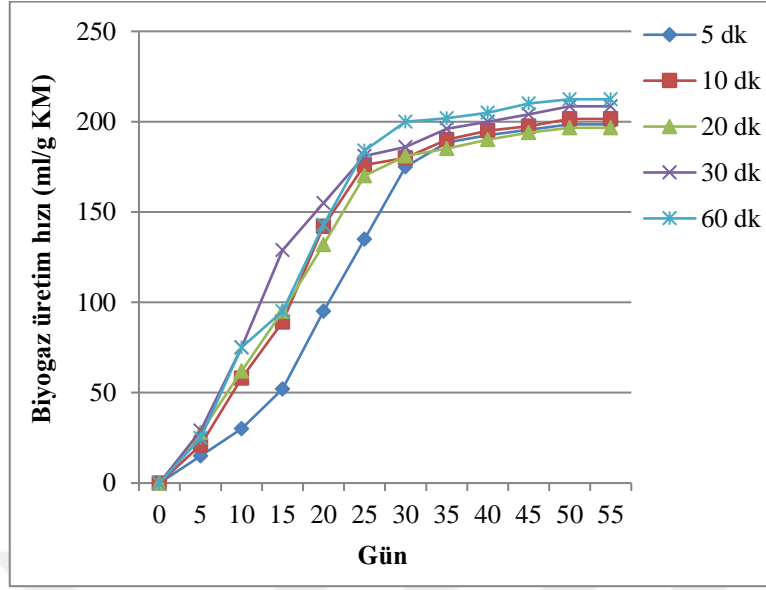
#### 6.2.6.1. Ultrases dalgası ön işlem sonucunda uygulanan anaerobik süreç



**Şekil 6.46** 5 kJ şiddetinde ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

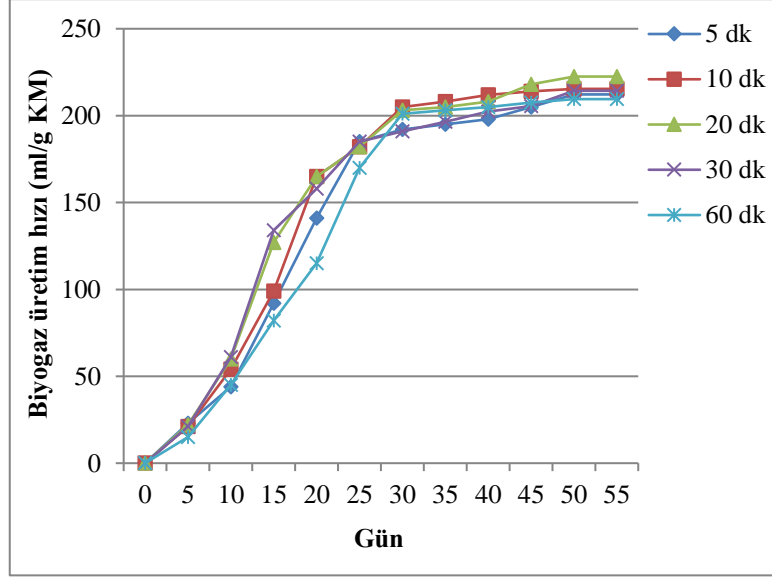
Şekil 6.46'da 5 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 30 dakika ön işlem uygulanması sonucu 211,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu 190,1 ml/g KM olarak ölçülmüştür.





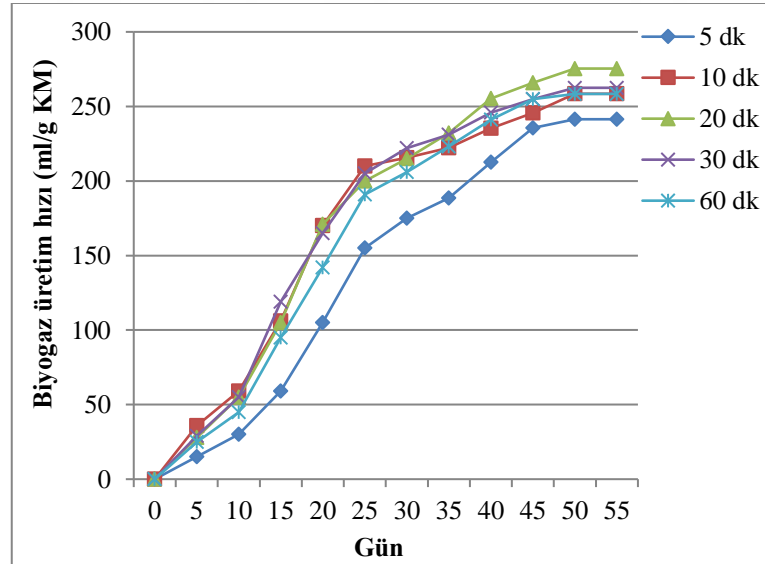
**Şekil 6.47** 10 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

Şekil 6.47’de 10 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 60 dakika ön işlem uygulanması sonucu 212,4 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu 196,6 ml/g KM değerinde ölçülmüştür.



Şekil 6.48 20 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

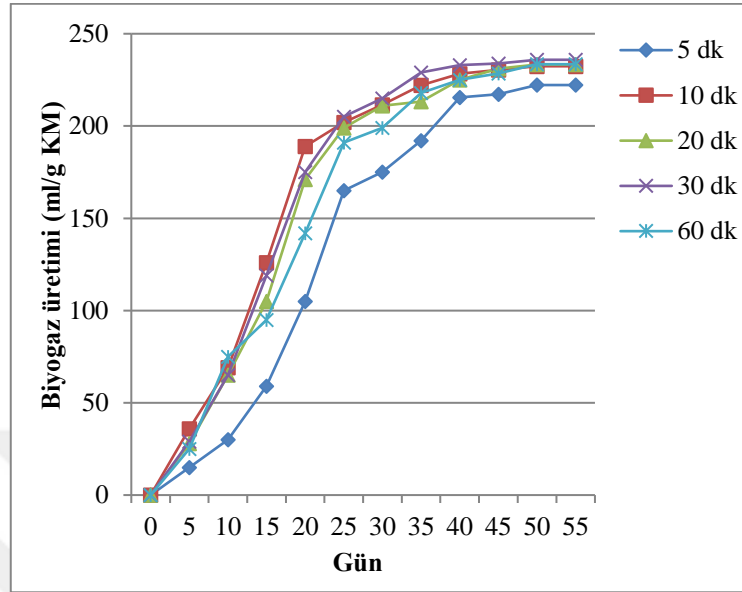
Şekil 6.48’de 20 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu 222,5 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 60 dakika ön işlem uygulanması sonucu 209,5 ml/g KM değerinde belirlenmiştir.



Şekil 6.49 30 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

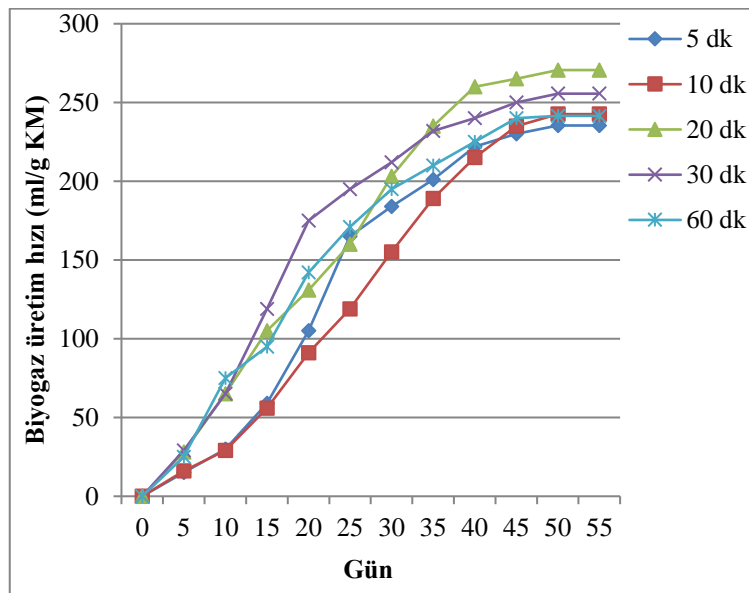
Şekil 6.49’da 30 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 20 dakika ön işlem

uygulanması sonucu 275,4 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu 241,4 ml/g KM değerinde ölçülmüştür.



Şekil 6.50 50 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

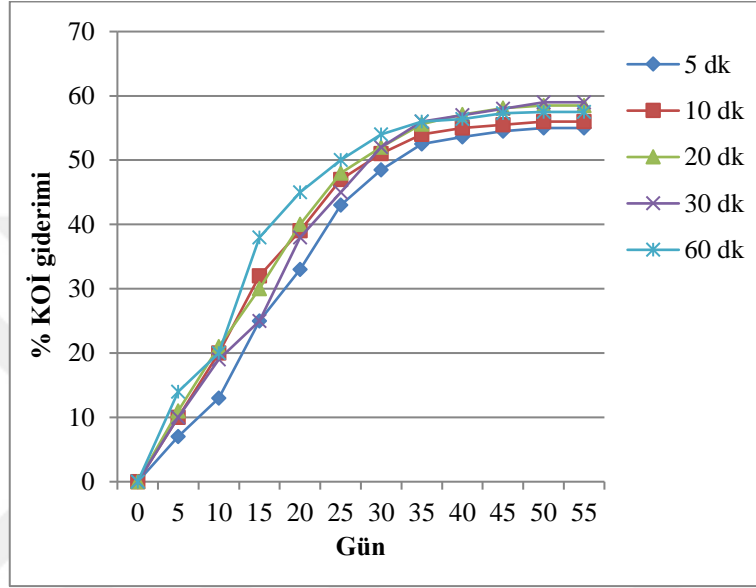
Şekil 6.50’de 50 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu 235,9 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu 222,2 ml/g KM olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.51 100 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç

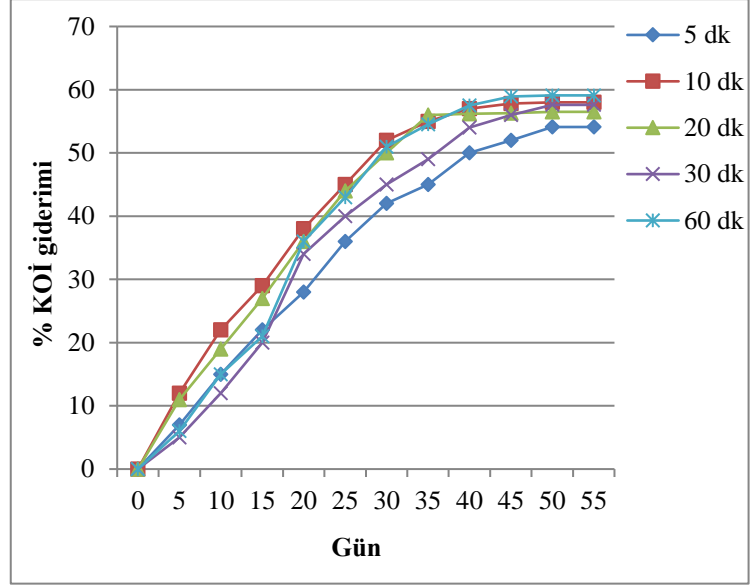
Şekil 6.51’de 100 kj şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç verilmiştir. Biyogaz üretimi genel olarak artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek biyogaz üretimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu 270,6 ml/g KM, en düşük biyogaz üretimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu 241,5 ml/g KM olarak ölçülmüştür.

#### 6.2.6.2 Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda reaktörlerin KOİ giderim süreci



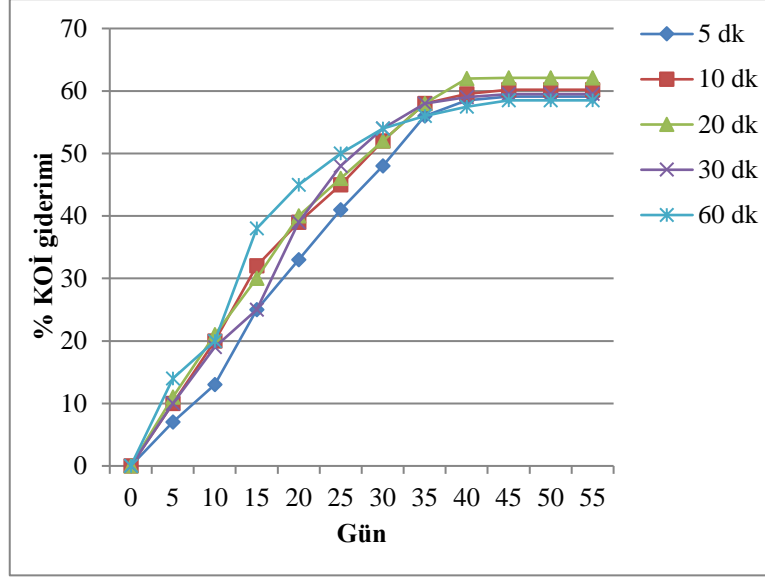
Şekil 6.52 5 kj şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

Şekil 6.52’de 5 kj şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi 30 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 59,0 oranında, en düşük % KOİ giderimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 55,0 oranında ölçülmüştür.



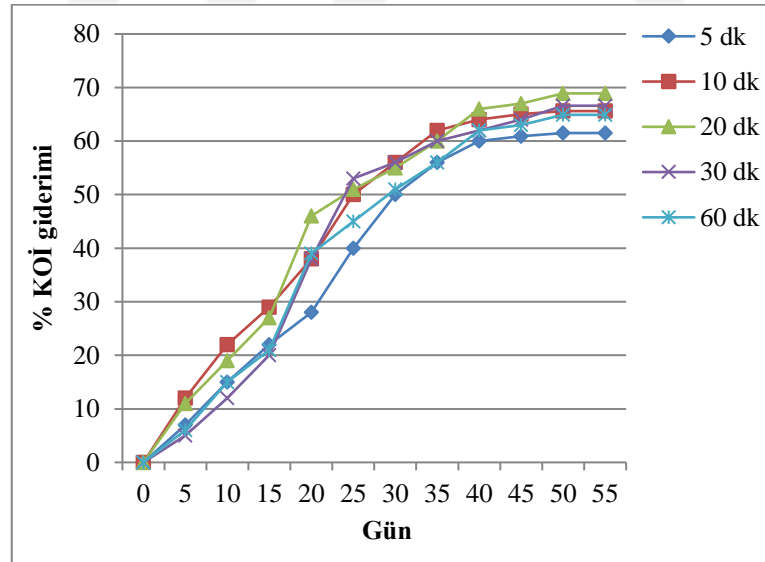
**Şekil 6.53** 10 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

Şekil 6.53'te 10 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi 60 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 59,1, en düşük % KOİ giderimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 54,1 oranında ölçülmüştür.



Şekil 6.54 20 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

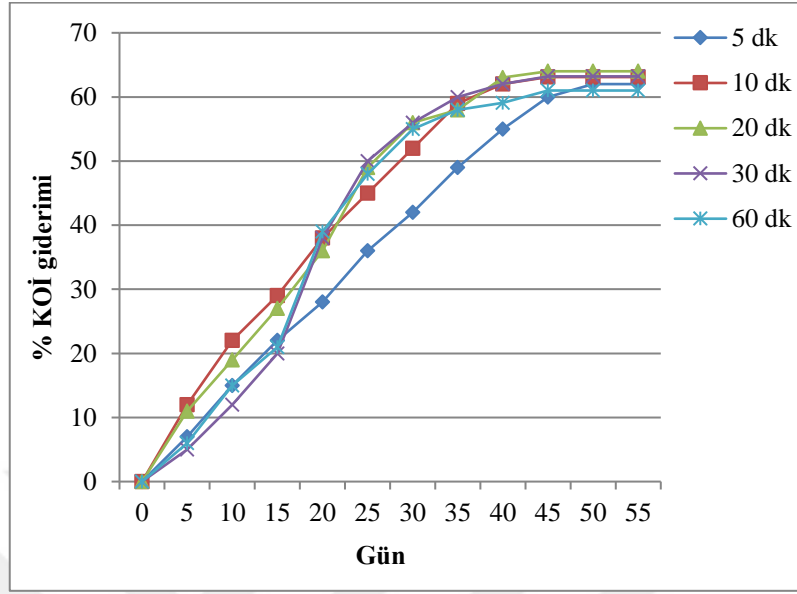
Şekil 6.54'te 20 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 62,1, en düşük % KOİ giderimi 60 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 58,5 oranında ölçülmüştür.



Şekil 6.55 30 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

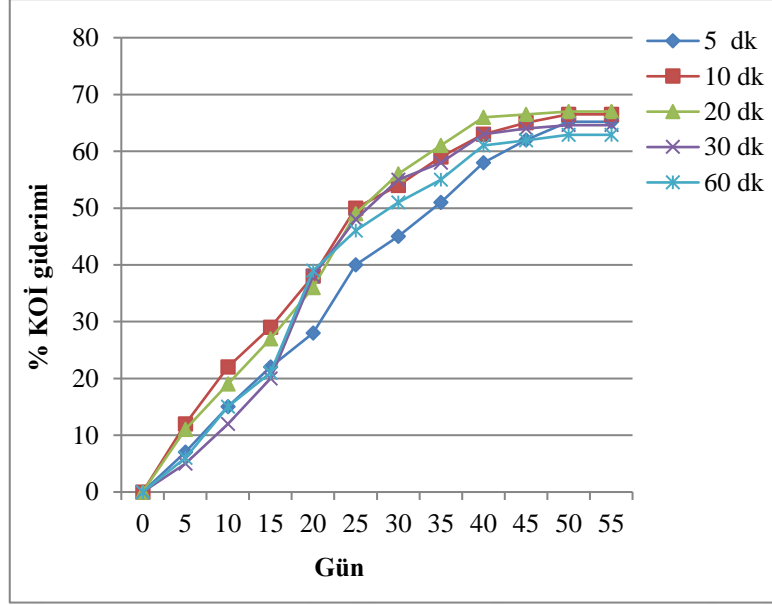
Şekil 6.55'te 30 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderim verimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en

yüksek % KOİ giderimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 68,9, en düşük % KOİ giderimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 61,5 olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.56 50 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

Şekil 6.56'da 50 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 64,0 oranında, en düşük % KOİ giderimi 5 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 61,0 oranında ölçülmüştür.



**Şekil 6.57** 100 kJ şiddetindeki ultrases dalgasının belirli zaman aralıklarında uygulanması sonucu anaerobik süreçteki KOİ giderimi

Şekil 6.57’de 100 kJ şiddetinde ki ultrases dalgasının farklı sürelerde uygulanması sonucu oluşan anaerobik süreç boyunca % KOİ giderimi verilmiştir. % KOİ giderimi genel olarak anaerobik süreç boyunca artan şekilde devam etmiştir. Anaerobik süreç sonunda en yüksek % KOİ giderimi 20 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 67,0 oranında, en düşük % KOİ giderimi 60 dakika ön işlem uygulanması sonucu % 62,9 oranında ölçülmüştür.



### 6.2.6.3 Ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda toplanan biyogaz analizi

Çizelge 6.17 Ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi

Ultrases dalga şiddeti (kj)	Ultrases dalga süresi	Reaktör adı	CH <sub>4</sub> içeriği (hacimce %)	CO <sub>2</sub> içeriği (hacimce %)	H <sub>2</sub> S içeriği(ppm)
5	5	R <sub>80</sub>	62,5	37,2	889
	10	R <sub>81</sub>	62,9	37,0	958
	20	R <sub>82</sub>	63,6	36,1	954
	30	R <sub>83</sub>	64,5	35,2	966
	60	R <sub>84</sub>	63,6	36,2	951
10	5	R <sub>85</sub>	65,2	34,5	849
	10	R <sub>86</sub>	62,1	37,6	885
	20	R <sub>87</sub>	61,9	37,6	956
	30	R <sub>88</sub>	63,6	36,1	903
	60	R <sub>89</sub>	64,5	35,1	893
20	5	R <sub>90</sub>	63,5	36,2	911
	10	R <sub>91</sub>	64,5	35,2	902
	20	R <sub>92</sub>	62,8	37,8	913
	30	R <sub>93</sub>	64,9	34,9	962
	60	R <sub>94</sub>	63,5	36,2	889
30	5	R <sub>95</sub>	61,6	38,0	943
	10	R <sub>96</sub>	60,9	39,0	952
	20	R <sub>97</sub>	63,5	36,1	983
	30	R <sub>98</sub>	65,0	34,8	995
	60	R <sub>99</sub>	62,8	37,1	906
50	5	R <sub>100</sub>	62,9	36,8	1089
	10	R <sub>101</sub>	62,5	37,0	983
	20	R <sub>102</sub>	63,2	36,3	1063
	30	R <sub>103</sub>	63,6	36,1	952
	60	R <sub>104</sub>	64,5	35,2	995
100	5	R <sub>105</sub>	65,2	34,5	1065
	10	R <sub>106</sub>	66,4	33,3	1032
	20	R <sub>107</sub>	64,9	35,0	987
	30	R <sub>108</sub>	63,8	36,0	1015
	60	R <sub>109</sub>	65,1	34,5	1003

Çizelge 6.17’de farklı şiddetlerde ve farklı sürelerde uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda oluşan biyogazın içerik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları maddeler halinde verilmektedir:

- 5 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 64,5, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 65,2 oranında,
- 10 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 65,2, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 61,9 oranında,
- 20 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 64,9, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 62,8 oranında,

- 30 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek hacimce CH<sub>4</sub> içeriği % 65,0 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 60,9 oranında,
- 50 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 64,5, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 62,5 oranında,
- 100 kj uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri uygulanan reaktörler arasında en yüksek CH<sub>4</sub> içeriği % 66,4 oranında, en düşük CH<sub>4</sub> içeriği % 63,8 oranında belirlenmiştir.

Farklı şiddetlerde ve sürelerde uygulanan ultrases dalgası ön işlemleri sonrasında organik maddenin anaerobik fermantasyonu sonucu oluşan biyogazın analizinde H<sub>2</sub>S değerleri arasından en yüksek 1089 ppm değerinde R<sub>100</sub>'de ve en düşük 849 değerinde R<sub>85</sub>'te meydana gelmiştir.

#### 6.2.6.4 Ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda organik atığın içeriğindeki lignoselülozik bileşenlerin miktarındaki değişim

**Çizelge 6.18** Ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda organik maddenin anaerobik fermantasyon sonrasında selüloz ve hemiselülozun suda çözünme değerleri

Ultrases dalga şiddeti (kj)	Ultrases dalga süresi	Reaktör adı	Selüloz giderimi (%)	Hemiselüloz giderimi (%)
5	5	R <sub>80</sub>	10,3	8,6
	10	R <sub>81</sub>	12,3	9,8
	20	R <sub>82</sub>	10,9	9,9
	30	R <sub>83</sub>	13,2	10,0
	60	R <sub>84</sub>	13,1	10,0
10	5	R <sub>85</sub>	12,5	9,0
	10	R <sub>86</sub>	12,7	9,8
	20	R <sub>87</sub>	13,2	9,5
	30	R <sub>88</sub>	13,4	9,9
	60	R <sub>89</sub>	13,7	10,5
20	5	R <sub>90</sub>	13,0	10,9
	10	R <sub>91</sub>	13,4	11,2
	20	R <sub>92</sub>	13,7	11,8
	30	R <sub>93</sub>	13,7	11,9
	60	R <sub>94</sub>	13,8	11,8
30	5	R <sub>95</sub>	19,5	15,6
	10	R <sub>96</sub>	20,2	15,9
	20	R <sub>97</sub>	21,4	15,8
	30	R <sub>98</sub>	22,5	17,5
	60	R <sub>99</sub>	22,4	18,0
50	5	R <sub>100</sub>	18,7	14,5
	10	R <sub>101</sub>	19,5	13,5
	20	R <sub>102</sub>	19,0	14,4
	30	R <sub>103</sub>	19,7	14,5
	60	R <sub>104</sub>	20,0	15,8
100	5	R <sub>105</sub>	17,4	13,5
	10	R <sub>106</sub>	19,5	14,3
	20	R <sub>107</sub>	20,6	16,9
	30	R <sub>108</sub>	21,0	16,5

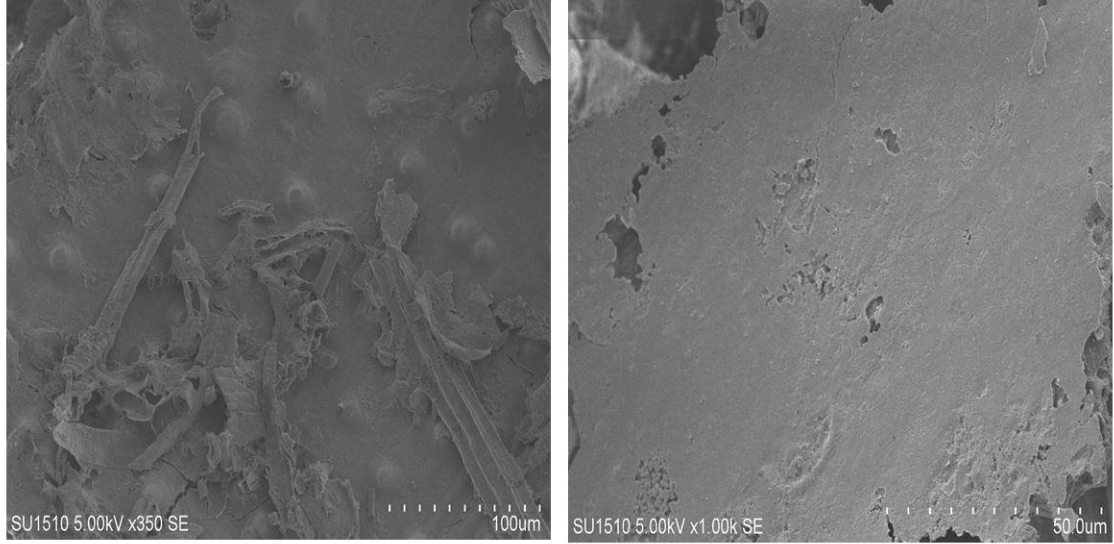
Çizelge 6.18’de farklı şiddetlerde ve zaman aralıklarında uygulanan ultrases dalgası ön işlemi sonucunda oluşan organik numunenin anaerobik fermantasyondan sonra oluşan organik gübreye ait selüloz ve hemiselüloz bileşenlerinin % çözünme miktarları verilmiştir. Bu ön işlem teknolojisi fiziksel bir ön işlem olduğundan ön işlem uygulandıktan sonra selüloz, hemiselüloz ve ligninin suda çözünme miktarlarında değişiklik olmamıştır. Fakat ultrases dalga ön işlemi selüloz kristalitesini ön işlem sırasında azalttığından anaerobik fermantasyon sırasında selüloz ve hemiselüloz değerlerinde çözümler meydana gelmiştir. Lignin değerinde ise anaerobik fermantasyon sonunda hiçbir değişiklik olmamıştır.

Ultrases dalga şiddetinin 5 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 13,2 ve hemiselüloz çözünmesi ise % 10,0 oranında belirlenmiştir. Selüloz çözünmesi, hemiselüloz çözünmesinden fazla olmuştur. Ultrases dalga şiddetinin 10 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 13,7 ve hemiselüloz çözünmesi ise % 10,5 olarak belirlenmiştir. Bu değerler 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde meydana gelmiştir. Ultrases dalga şiddetinin 20 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 13,8 ve hemiselüloz çözünmesi ise % 11,9 oranında belirlenmiştir. Ultrases dalga şiddetinin 30 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 22,5 ve hemiselüloz çözünmesi ise % 18,0 oranında belirlenmiştir. Ultrases dalga şiddetinin 50 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 20,0 ve hemiselüloz çözünmesi ise % 15,8 olarak belirlenmiştir. Ultrases dalga şiddetinin 100 kj oranında sabit tutulup farklı sürelerde uygulandığı reaktörler arasında selüloz çözünmesi en fazla % 21,0 oranında ve hemiselüloz çözünmesi ise % 16,9 oranında belirlenmiştir.

Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda selüloz ve hemiselüloz çözümleri ultrases dalga sürelerine ve dalga şiddetlerine göre değişiklik göstermiştir. Sonuç olarak ultrases dalgası fiziksel bir ön işlem olmasına rağmen anaerobik prosesde selüloz ve hemiselüloz giderimine yol açmıştır. Bunun başlıca nedenleri arasında düşük frekanslarda uygulanan ultrasesin yüzey morfolojisine etki ederek sistemin selülozik suda çözünmesi için uygun enzimlerin alt yapısını oluşturmuş olmasıdır. Ultrases dalgasının sadece rijit yapıyı

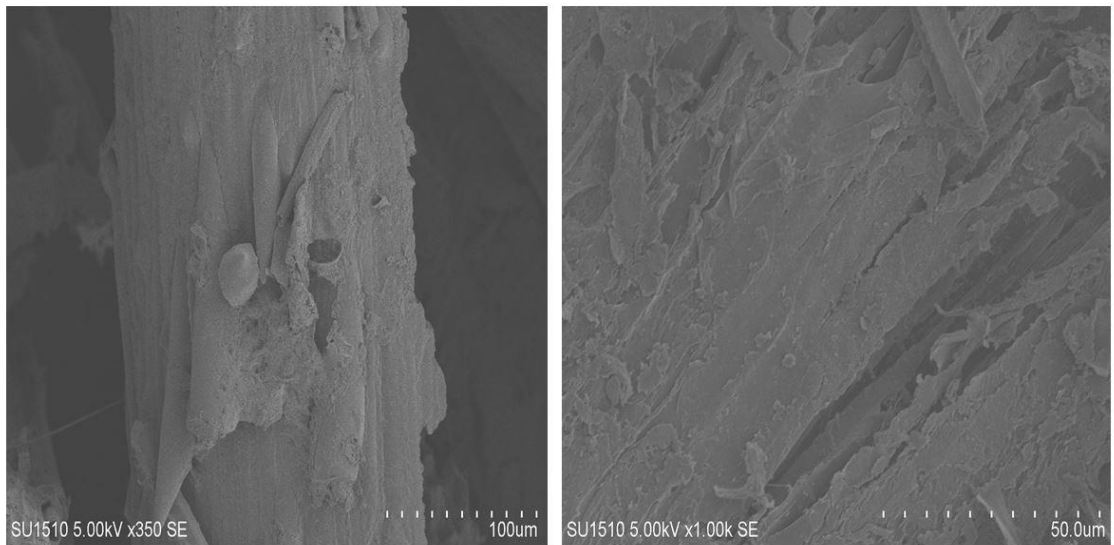
etkilediği SEM görüntüleri ile ispatlanmıştır. Bu yapının etkilenmesi anaerobik süreçte selüloz ve hemiselülozun çözünmesinde rol oynamıştır.

#### 6.2.6.5. Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda organik atığın SEM görüntüleri



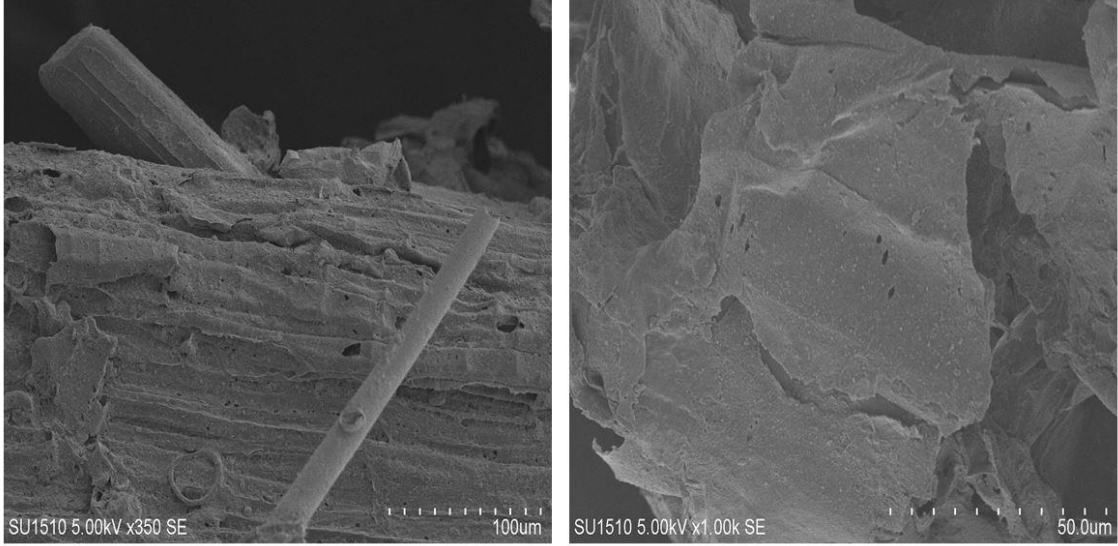
**şekil 6.58** Ön işlem uygulanmayan organik numunenin SEM görüntüleri

şekil 6.58’de herhangi bir ön işlem uygulanmayan organik numuneye ait yüzeyin 350 ve 1000 kat büyütölmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüleri göre yüzey morfolojisinde organik numunenin yüzey kristalitesinin olduğu ve yüzeyin sert bir tabakadan meydana geldiği ve herhangi bir kırık, çatlak ve gözenekli bir yapı oluşmadığı görünmektedir.



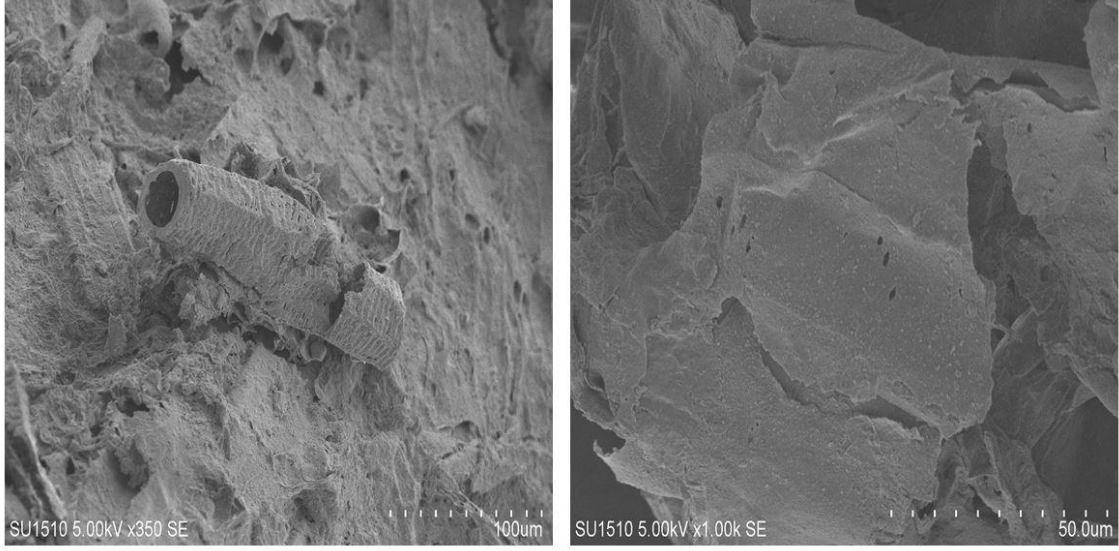
**şekil 6.59** 5 kJ ve 30 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

Yukarıdaki şekil 6.59’da 5 kj ve 30 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem uygulanmayan numunelere göre çok az azalmalar olduğu ve kristal yapıdan daha yumuşak yapıya geçişin başlangıç aşamasında olduğu görülmektedir.



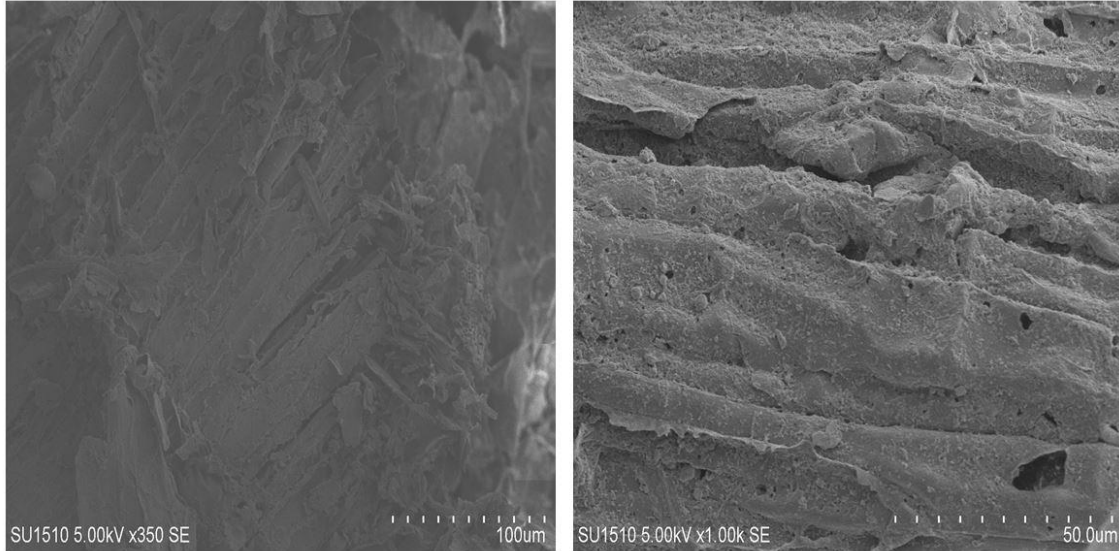
**Şekil 6.60** 10 kj ve 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

Şekil 6.60’ta 10 kj ve 60 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem uygulanmayan numunelere göre kırılmaların ve çatlakların oluşmaya başladığı görülmektedir. 5 kj şiddetinde uygulanan ön işleme göre daha fazla kırılma ve çatlaklar olduğu açıktır. Yüzey kristalite yapısı ise 5 kj uygulanan ön işleme göre daha az görülmektedir.



**Şekil 6.61** 20 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

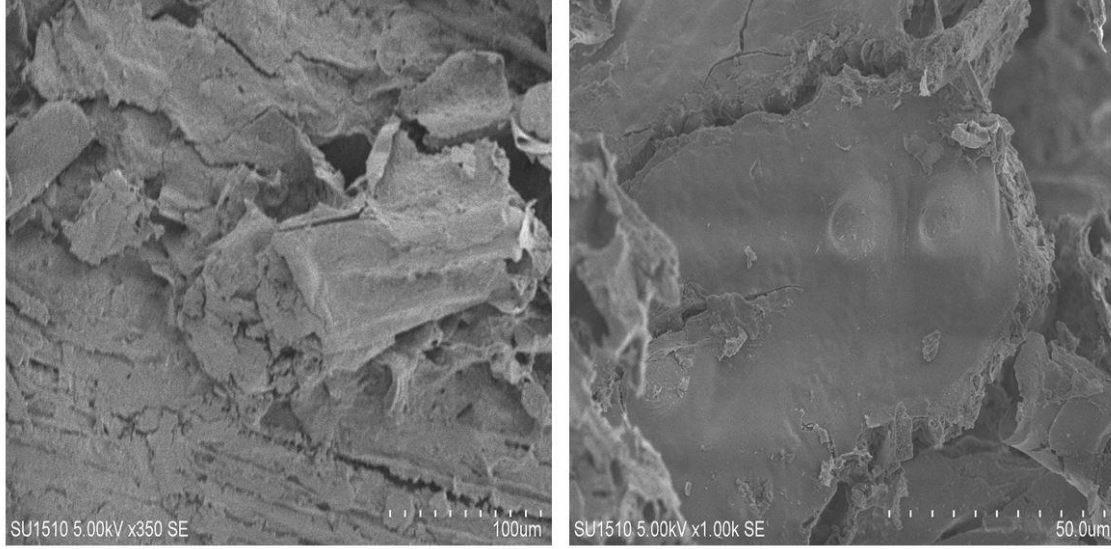
Şekil 6.61’de 20 kJ ve 20 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem uygulanmayan numunelere göre kırılmaların ve çatlakların çok daha fazla olduğu açıktır. 5 kJ ve 10 kJ şiddetinde uygulanan ön işleme göre daha fazla ve geniş boyutlu kırılma ve çatlaklar olduğu görülmektedir. Yüzey kristalite yapısı ise 5 kJ ve 10 kJ uygulanan ön işleme göre daha az görünmektedir.



**Şekil 6.62** 30 kJ ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

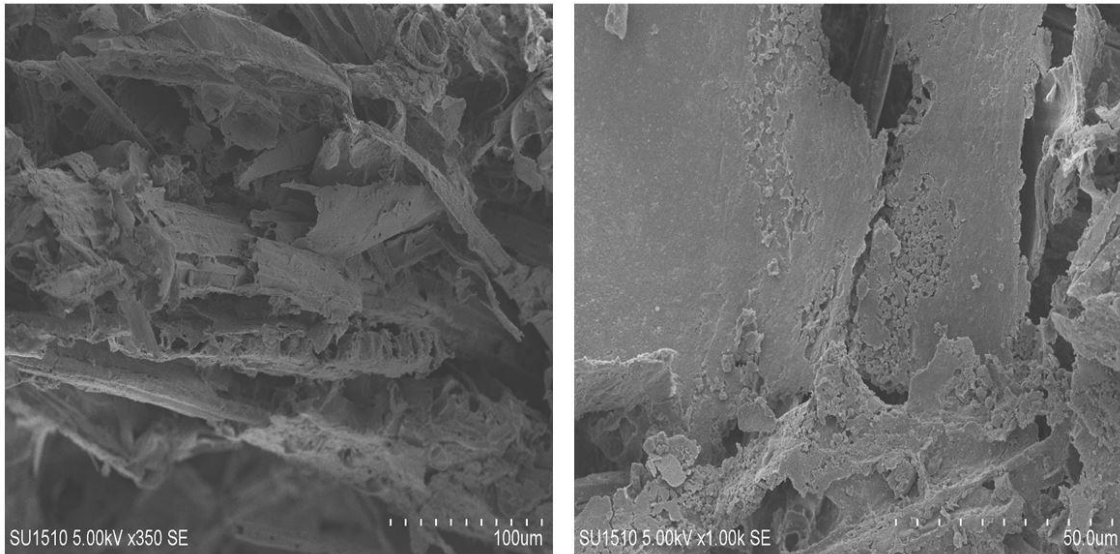
Şekil 6.62’de 30 kJ ve 20 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem

uygulanmayan numunelere göre kırılmaların ve çatlakların çok daha fazla olduğu açıktır. Bu görüntüde 20 kj şiddetindeki uygulanan ultrases dalgası ön işlemine benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Farklı olarak sadece yüzey kristalitesi daha da azalmıştır.



**Şekil 6.63** 50 kj ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

Şekil 6.63'te 30 kj ve 20 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem uygulanmayan numunelere göre kırılmaların ve çatlakların çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu görüntüde 20 kj ve 30 kj şiddetindeki uygulanan ultrases dalgası ön işlemine göre daha sık kırılma ve çatlakların oluştuğu görünmektedir. Ön işlem şiddeti 50 kj ve 20 dakikaya gelince daha küçük boyutlu kırık ve çatlaklar oluşmuştur.



**Şekil 6.64** 100 kj ve 20 dakika ön işlem uygulanan reaktörün SEM görüntüleri

Şekil 6.64'te 100 kJ ve 20 dakika ultrases dalgası ön işlemi uygulanması sonucunda oluşan organik numuneye ait yüzeyin 350 kat ve 1000 kat büyütülmüş halinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre organik numunenin yüzey morfolojisinde ön işlem uygulanmayan numunelere göre kırılmaların ve çatlaklar ön işlem süresi ve şiddeti arttıkça artmıştır. Bu görüntüde 50 kJ ve 30 kJ şiddetindeki uygulanan ultrases dalgası ön işlemine göre daha sık kırılma ve çatlakların oluştuğu görünmektedir. Sonuç olarak ultrases dalgası ön işlemi sonucunda yüzeyde herhangi bir gözenekli yapıya rastlanmamış olup sadece ultrases dalgası şiddeti arttıkça selüloz kristalitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Buda ultrases dalgası ön işlemi uygulanan organik maddelerin anaerobik süreçte selüloz ve hemiselülozun bir kısmının suda çözünmesine ve hidroliz aşamasının kısalmasına neden olmuştur.





### 6.3. Standart Sapmalar ve Belirsizlik Analizleri

Bir veri grubunda bulunan sayılan birbirine olan yakınlığını ve uyumunu ölçen yöntem standart sapmadır. İki farklı veri grubunun aritmetik ortalaması aynı ise; açıklığı büyük olanın standart sapması büyük, küçük olanın ise standart sapması küçük olur. Standart sapma sıfıra yaklaştıkça gruptaki verilerin farklılıkları azalır [130].

Deneysel çalışmalarda standart sapmanın yanında belirsizlik analizlerine ihtiyaç vardır [131]. Yapılan çalışmada cihaz hassasiyeti, tartım için gerekli ortam koşulları ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonu gibi nedenlerden dolayı belirsizlikler ve hatalar meydana gelmektedir [132]. Bu çalışmada selüloz, hemiselüloz, lignin, metan, karbondioksit, hidrojen sülfür, pH, sıcaklık, kuru madde, organik madde, biyogaz üretim hızı ve KOİ analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin standart sapmaları çizelge 6.19'da verilmiştir.

**Çizelge 6.19** Çalışmada yapılan analizlerin standart sapmaları

Tanımı	Birimi	Standart sapmalar(±)
% C	g(% kuru madde)	0,50
% N	g(% kuru madde)	0,18
Kül	g(% kuru madde)	0,11
Organik madde	g(% kuru madde)	0,59
Kuru madde	g	% 1,51
KOİ	mg/L	% 1,08
Suda çözünme yüzdesi	%	3,98
Selüloz	g(% kuru madde)	1,59
Hemiselüloz	g(% kuru madde)	1,93
Lignin	g(% kuru madde)	2,59
Biyogaz üretim hızı	ml/g KM	10,8
Sıcaklık	°C	1,5
CH <sub>4</sub>	Hacimce %	1,55
CO <sub>2</sub>	Hacimce %	1,26
H <sub>2</sub> S	ppm	15,5
pH	-	0,05

## 7. SONUÇLARIN LİTERATÜR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

### 7.1. Termal Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Çizelge 7.1** Termal ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Termal ön işlem koşulları	Ön işlem sonrasında anaerobik fermantasyon sonucu etkileri	Organik madde cinsi	Referans
100 °C ve 1 saat	Selüloz = %14,8 Hemiselüloz = % 22,2 Lignin= % 13,4	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
180 °C ve 1 saat	Selüloz = % 38,2 Hemiselüloz = % 32,9 Lignin= % 23,2	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
100 °C ve 1 saat	Selüloz = % 14,7 Hemiselüloz = % 20,1 Lignin= % 13,6	Pirinç samanı	[133]
55 °C ve 8 gün	Selüloz = % 22,7 Hemiselüloz = % 14,6 Lignin= % 39,9	Pirinç samanı	[139]
170 °C ve 10 dakika	Selüloz = % 15,0 Hemiselüloz = - Lignin= % 24,8	Alaca yapraklı kamuş	[156]
190 °C ve 10 dakika	Selüloz = % 10,9 Hemiselüloz = - Lignin= % 32,9	Alaca yapraklı kamuş	[156]
210 °C ve 15 dakika	Selüloz = % 14,3 Hemiselüloz = % - Lignin= % 49,1	Alaca yapraklı kamuş	[156]
230 °C ve 5 dakika	Selüloz = % 15,4 Hemiselüloz = % - Lignin= % 57,5	Alaca yapraklı kamuş	[156]

Çizelge 7.1’de organik maddeye termal ön işlem uygulanması sonucu lignoselülozik yapının içerisinde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gideriminin literatür değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Literatür çalışmaları arasında referans [156]’ya göre en yüksek lignin giderimi 230 °C’de ve % 57,5 oranında meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise 100 °C ve 1 saat termal ön işlem sonucunda % 13,4 lignin giderimi meydana gelmiştir. Sıcaklığın artmasıyla lignin çözünmesi artmıştır. Benzer şekilde yine bu çalışmada 180 °C ve 1 saat termal ön işlem uygulanan bu çalışmada lignin % 23,2 giderilmiştir. Referans [133]’e göre pirinç samanına bu çalışmadaki gibi aynı sıcaklık ve aynı süreye göre termal ön işlem uygulanmış ve lignin giderim değerini benzer şekilde elde etmiştir. Selüloz giderimi literatürde en fazla referans [139]’da 55 °C’de 8 gün bekletilen organik numunede % 22,7 olarak meydana gelmiştir. Fakat bu çalışmada 180 °C ve 1 saat uygulanan termal ön işlem

sonucunda % 38,2 selüloz giderimi gözlemlenmiştir. Bu da yüksek sıcaklıklarda selüloz çözünmesinin zamana bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Hemiselüloz giderimi literatürde en yüksek 100 °C ve 1 saat boyunca uygulanan ön işlem sonucunda % 20,1 olarak referans [133]' de meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise yine 100 °C ve 1 saat boyunca uygulanan ön işlem sonucunda % 22,2 oranında meydana gelmiştir. Organik maddelerin farklı olmasına rağmen aynı ön işlemin uygulanması sonucu benzer değerlerde hemiselüloz giderimi olmuştur. Bu nedenle lignoselülozik bileşenlere ait organik numunelerin gideriminde organik maddenin cinsine bakılmaksızın uygulanan ön işlem süresi ve miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

**Çizelge 7.2** Termal ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

<b>Termal ön işlem koşulları</b>	<b>Ön işlem sonrasında anaerobik fermantasyon sonucu etkileri (daha fazla metan üretimi)</b>	<b>Organik madde cinsi</b>	<b>Referans</b>
100 °C ve 1 saat	% 41,5	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
180 °C ve 1 saat	% 100,6	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
200 °C ve 15 dakika	% 27	Buğday samanı	[134]
120 °C ve 1 saat	% 37	Kentsel katı atık karışımları	[135]
121 °C ve 1 saat	% 29	Buğday samanı	[136]
121 °C ve 1 saat	% 11	Şeker kamışı	[136]
180 °C ve 1 saat	% 53	Buğday samanı	[137]
120 °C ve 1 saat	% 64	Buğday samanı	[153]
120 °C ve 1 saat	% 32	Pirinç samanı	[153]
120 °C ve 1 saat	% 41	Arpa samanı	[153]

Çizelge 7.2'de organik maddeye termal ön işlem uygulanması sonucu biyogaz üretimi ve metan üretimi üzerindeki artışların literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Öncelikle bu çalışmada 100 °C ve 1 saat uygulanan ön işlem sonucunda % 41,5 daha fazla biyogaz üretimi olurken 180 °C ve 1 saat uygulanan ön işlem sonucunda % 100,6 olarak meydana gelmiştir. Referans [134]'e göre yapılan bir çalışmada 200 °C'de ve 15 dakika boyunca uygulanan ön işlem sonucunda % 27 daha fazla metan üretimi olmuştur. Termal ön işlemin daha yüksek sıcaklıkta uygulanmasına rağmen, uygulanma süresinin daha düşük olması biyogaz üretimini çok fazla artırmamıştır. Güncel literatür değerleri incelendiğinde genel olarak aynı ön işlem uygulanma sürelerine göre ön işlem sıcaklıkları arttıkça biyogaz üretimi artmıştır.

## 7.2. Alkali Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Çizelge 7.3** Alkali ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Alkali Ön işlem koşulları	Lignoselülozik bileşenin suda çözünmesi (pirinç samanı)	Organik madde cinsi	Referans
8N NaOH, 1 saat Reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar NaOH eklenmesi	Selüloz = % 15,2 Hemiselüloz = % 37,8 Lignin= % 30,3	SG, MS ve ŞPK kütlege 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
% 5'lik NH <sub>3</sub> 35 °C 24 saat	Selüloz = % 49,3 Hemiselüloz = % 39,7 Lignin= % 32,3	Pirinç samanı	[133]
Kireç ön işlem	Selüloz = % 23,4 Hemiselüloz = % 13,1 Lignin= -	Pirinç samanı	[154]
1 g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 13,9 Hemiselüloz = - Lignin= % 31,5	Alaca yapraklı kamış	[156]
3 g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 11,1 Hemiselüloz = - Lignin= % 32,0	Alaca yapraklı kamış	[156]
5g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 19,0 Hemiselüloz = % - Lignin= % 29,1	Alaca yapraklı kamış	[156]
7g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 15,6 Hemiselüloz = % - Lignin= % 36,8	Alaca yapraklı kamış	[156]
12 g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 9,4 Hemiselüloz = - Lignin= % 46,2	Alaca yapraklı kamış	[156]
20 g/L NaOH ve 24 saat	Selüloz = % 15,5 Hemiselüloz = - Lignin= % 54,7	Alaca yapraklı kamış	[156]

Çizelge 7.3'te organik maddeye alkali ön işlem uygulanması sonucu lignoselülozik yapının içerisinde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gideriminin literatür değerleriyle karşılaştırılması verilmiştir. Literatür çalışmaları arasında referans [156]'ya göre en yüksek lignin giderimi 20 g/L NaOH ve 24 saat boyunca uygulanan ön işlem % 54,7 olarak meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise NaOH reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar 8 N NaOH eklenmesi ön işlem sonucunda % 30,3 lignin giderimi meydana gelmiştir. Alkali ön işlemlerde alkali miktarı arttıkça lignin çözünmesi artmıştır. Referans [133]'e göre pirinç samanına % 5'lik NH<sub>3</sub>, 24 saat boyunca uygulanması sonucunda % 49,3 selüloz giderimi

meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise alkali ön işlem süresi 1 saat olarak seçilmiştir. Alkali ön işlem uygulanırken alkali uygulanma süresinin fazla olması lignoselülozik yapının çözünmesini etkilediği sonucuna varılmıştır. Referans [156]'ya göre yapılan bir çalışmada alkali ön işlem miktarı arttıkça selülozun çözünmesi değişiklik göstermiştir fakat lignin çözünmesi genel olarak alkali miktarı arttıkça artmıştır. Hemiselüloz giderimi bu çalışmada 8N NaOH ön işlemin reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar eklenmesi sonucunda % 37,2 oranında selülozun suda çözünmesi sağlanmıştır. Benzer çalışmada olan referans [154]'e göre % 39,7 hemiselüloz suda çözünmüştür. Alkali ön işlem sonucunda güncel literatür listesinde ve bu çalışmada en fazla lignin ve hemiselüloz çözüldüğü, selülozun ise bu iki bileşene göre daha az çözüldüğü meydana gelmiştir.

**Çizelge 7.4** Alkali ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

<b>Alkali Ön işlem koşulları</b>	<b>Ön işlem sonucu</b>	<b>Organik madde cinsi</b>	<b>Referans</b>
8N NaOH, 1 saat, reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar NaOH eklenmesi	% 59,9 daha fazla biyogaz üretimi	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
NaOH miktarı, reaktördeki katımaddekütlesinin % 1,6 sı kadar eklenmesi	% 21,4 daha fazla metan üretimi	Pirinç samanı	[141]
Kütlece % 4'lük NaOH çözeltisi ile ön işlem	% 54,7 daha fazla biyogaz üretimi	Çeltik samanı	[155]
% 4' lük KOH çözeltisi ile ön işlem	% 41 daha fazla metan üretimi	Buğday samanı	[157]
NaOH miktarı % 0,5'lik (w/v)	% 27,3 daha fazla biyogaz üretimi	Pirinç samanı	[159]
NaOH miktarı % 1'lik (w/v)	% 36,7 daha fazla biyogaz üretimi	Pirinç samanı	[159]
NaOH miktarı % 2'lik (w/v)	% 23,2 daha fazla biyogaz üretimi	Pirinç samanı	[159]
NaOH miktarı % 3'lük (w/v)	% 18,9 daha fazla biyogaz üretimi	Pirinç samanı	[159]

Çizelge 7.4'te organik maddeye alkali ön işlem uygulanması sonucu biyogaz üretimi ve metan üretimi üzerindeki artışların literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Güncel literatürde en yüksek biyogaz üretimi kütlece % 4'lük NaOH eklenmesi ile biyogaz üretiminde % 54,7 artış meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise 8N NaOH, 1 saat bekletilmesi sonucunda % 59,9 daha fazla biyogaz oluşmuştur. Referans [159]'a göre % 0,5'lik (w/v) NaOH ön işlemine göre % 27,3 daha fazla biyogaz üretimi ve % 2' lik (w/v) NaOH ön işlemine göre ise % 23,2'lik daha fazla biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Referans [159]'a göre alkali konsantrasyonunun belirli bir derecesine kadar ön işlemden önceki alkali miktarı

arttıkça biyogaz üretimi genel olarak artar fakat belirli konsantrasyonların üzerine çıkıldıkça alkali çözelti miktarı gereksiz kullanılmış olur. Bu durum daha fazla maliyete yol açmaktadır. Bu nedenle alkali ön işlem teknolojilerinde alkali miktarının optimizasyonu önem kazanmaktadır.



### 7.3. Asit Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Çizelge 7.5** Asit ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Asit Ön işlem koşulları	Lignoselülozik bileşenin suda kütlece % çözünme oranları	Organik madde cinsi	Referans
% 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1 saat, Reaktördeki katı kütlesinin % 30'u kadar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> eklenmesi	Selüloz = % 19,8 Hemiselüloz = % 27,8 Lignin= % 11,5	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
% 5'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Selüloz = % 65,5 Hemiselüloz = - Lignin= % 19,5	Su sümbülü	[140]

Çizelge 7.5'te organik maddeye asit ön işlem uygulanması sonucu lignoselülozik yapının içerisinde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gideriminin literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Literatür çalışmasında referans [140]'a göre en yüksek lignin giderimi % 5'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 90 dakika boyunca uygulanan ön işlem ile % 19,5 olarak meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise % 15'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinin reaktördeki katı kütlesinin % 30'u kadar eklenmesi sonucunda % 11,5 lignin giderimi meydana gelmiştir. Asit ön işlem sonucunda lignoselülozik bileşenler arasında en yüksek giderim hemiselülozda meydana gelmiştir. Lignin giderimi asit ön işlemden selüloz ve hemiselüloz kadar etkilenmemiştir. Aynı şekilde selülozda hemiselüloza yakın benzer çözünme oranı göstermiştir.

**Çizelge 7.6** Asit ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Asit ön işlem koşulları	Ön işlem sonucu	Organik madde cinsi	Referans
8 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1 saat, Reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> eklenmesi	% 43,2 daha fazla biyogaz üretimi	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
8 N HNO <sub>3</sub> , 1 saat, Reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar HNO <sub>3</sub> eklenmesi	% 66,9 daha fazla biyogaz üretimi	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
%20'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisinin reaktöre katı madde oranının kütlece % 20'si kadar eklenmesi	% 45,7 daha fazla biyogaz üretimi	Sığır gübresi	[160]
%20'lik H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> çözeltisinin reaktöre katı madde oranının kütlece % 20'si kadar eklenmesi	% 56,0 daha fazla biyogaz üretimi	Sığır gübresi	[160]
%20'lik HNO <sub>3</sub> çözeltisinin reaktöre katı madde oranının kütlece % 20'si kadar eklenmesi	% 60,6 daha fazla biyogaz üretimi	Sığır gübresi	[160]

Çizelge 7.6'da organik maddeye asit ön işlem uygulanması sonucu biyogaz üretimi ve metan üretimi üzerindeki artışların literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Güncel literatürde en yüksek biyogaz üretimi referans [160]'da % 60,6 olarak HNO<sub>3</sub> asitinin kullanılması ile meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve HNO<sub>3</sub> çözeltilerinin karşılaştırılması sonucu HNO<sub>3</sub>'de daha fazla biyogaz üretimi meydana gelmiştir. Yapılan bir çalışmada asit ön işlem kullanılırken H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> asitlerinin ön işlemi karşılaştırılmıştır [160]. En yüksek biyogaz üretimi ise HNO<sub>3</sub> çözeltisi ile ön işlem uygulanması sonucu elde edilmiştir. Bu nedenle HNO<sub>3</sub>'ün asit ön işlem teknolojilerinde tercih edilmesi daha faydalıdır.



#### 7.4. Termokimyasal Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Çizelge 7.7** Termokimyasal ön işlem sonucunda lignoselülozik yapıların % azalmalarının güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Termokimyasal ön işlem koşulları	Lignoselülozik bileşenin kütlece % suda çözünmesi	Organik madde cinsi	Referans
% 15' lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 100 °C ve 30 dakika	Selüloz = % 27,7 Hemiselüloz = % 30,5 Lignin= % 37,6	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
8N NaOH 100 °C ve 30 dakika	Selüloz = % 38,8 Hemiselüloz = % 35,9 Lignin= % 45,9	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
% 0,01'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 120 °C ve 60 dk.	Selüloz = % 31,6 Hemiselüloz = % 32,9 Lignin= % 66,5	Pirinç samanı	[133]
Muz kabuğu külü ve kireç (kütlece 2:1 karışımı) 90 °C ve 10 saat	Selüloz = % 16,3 Hemiselüloz = % 32,9 Lignin= % 45,3	Mısır sapı	[138]
Muz kabuğu külü ve kireç (kütlece 2:1 karışımı) 90 °C ve 10 saat	Selüloz = % 16,6 Hemiselüloz = % 29,7 Lignin= % 38,7	Pirinç samanı	[138]
NaOH katısı reaktör içindeki kuru maddenin kütlece % 7'si kadar eklenmesi ve 60 °C'de 60 saat maruz bırakılması	Selüloz = % 19,1 Hemiselüloz = % 77,5 Lignin= % 61,0	Pirinç samanı	[144]

Çizelge 7.7'de organik maddeye termokimyasal ön işlem uygulanması sonucu lignoselülozik yapının içerisinde bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin gideriminin literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Literatür çalışmasında referans [133]'e göre en yüksek lignin giderimi % 0,01'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinin 120 °C ve 60 dakika termal asit ön işlem uygulanması sonucunda % 66,5 olarak meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise % 15' lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinin reaktördeki katı kütlece % 30'u kadar eklenmesi sonucunda % 37,6 oranında lignin giderimi meydana gelmiştir. Güncel literatür karşılaştırmaları incelendiğinde asit termal ön işlemin alkali termal ön işlemden daha çok lignin giderdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise alkali termal ön işlemler sonucunda ligninin asit termal ön işleme göre daha fazla çözüldüğü görülmüştür. Bu bağlamda organik numuneye uygulanan termokimyasal ön işlem organik maddenin cinsine göre yapısındaki lignoselülozik yapının çözünmesi değişiklik göstermektedir. Literatürde düşük sıcaklıkta

yapılan termokimyasal ön işlem uzun sürelerde etkili olmuştur ve selüloz çözünmesi en fazla referans [133]'de % 31,6 olarak meydana gelmiştir. Hemiselüloz giderimi ise güncel literatürde en yüksek % 77,5 olarak referans [144]'deki çalışmada olmuştur. Bu çalışmadan farklı olarak güncel literatürde daha çok düşük sıcaklıklarda uzun süre bekletilmesi ele alınmıştır. Bu çalışmada ise yüksek sıcaklıkta 30 dakika maruz bırakılması değerlendirilmiştir. Literatür değerlerinden farklı olarak asit termal ön işlem uygulanan bu çalışmada daha % 30,5 hemiselüloz giderimi olurken 90 °C' de 10 saat bekletilen referans [138]'deki çalışmada % 29,7 hemiselüloz giderimi olmuştur. Biyogaz üretiminde kullanılan güncel termokimyasal ön işlem literatürleri genel olarak alkali termal ön işlemler şeklinde yapılmıştır. Asit termal ön işlemler literatürde oldukça azdır.

**Çizelge 7.8** Termokimyasal ön işlem sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

<b>Termokimyasal ön işlem koşulları</b>	<b>Ön işlem sonucu</b>	<b>Organik madde cinsi</b>	<b>Referans</b>
8N NaOH miktarı reaktöre katı kütlesinin % 15'i kadar eklenmesi	% 120,7 daha fazla biyogaz üretimi	SG, MS ve ŞPK kütlece 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
NaOH miktarı, reaktördeki kütlesinin % 8'i kadar eklenmesine ve 100 °C'ye 10 dakika maruz bırakılması	% 181,2 daha fazla metan üretimi	Çam ağacı	[142]
NaOH miktarı, reaktördeki hacmin % 8'i kadar (kütlece) eklenmesi ve 100 °C'ye 60 dakika maruz bırakılması	% 54,5 daha fazla metan üretimi	Buğday samanı	[143]
NaOH miktarı % 1'lik (w/v) ve 180 °C' de 1 saat	244 ml/g UK biyogaz üretimi	Çam ağacı	[158]

Çizelge 7.8'de organik maddeye termokimyasal ön işlem uygulanması sonucu biyogaz üretimi ve metan üretimi üzerindeki artışların literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Güncel literatürde en yüksek biyogaz üretimi referans [142]'de % 181,2 olarak meydana gelmiştir. Bu çalışmada ise en yüksek biyogaz üretimi % 120,7 olarak NaOH termal ön işlem sonucunda oluşmuştur. Referans [143]'deki çalışmada % 8'i kadar alkali ekleyerek 100 °C'de 60 dakika maruz bırakılması sonucu % 54,5 biyogaz üretimi elde edilmiştir. Bu sonuçtan da anlaşılacağı üzere ön işlemde kullanılan alkali miktarı biyogaz üretimini oldukça etkilemektedir.

## 7.5. Ultrases Dalgası Ön İşlem Sonuçlarının Karşılaştırılması

**Çizelge 7.9** Ultrases dalgası ön işleminde sonucunda biyogaz üretimindeki % artışların güncel literatür değerleriyle karşılaştırılması

Ultrases dalgası ön işlem koşulları	Ön işlem sonucu	Organik madde cinsi	Referans
30 kJ ve 20 dakika (25 W)	% 52,5 daha fazla biyogaz üretimi	SG, MS ve ŞPK kütüce 2:1:1 karışımı	Bu çalışma
0,4 W/ml ve 10 dakika	% 20 daha fazla metan üretimi	Zeytin atıksuyu	[145]
520 kJ/kg KM	% 36,9 daha fazla biyogaz üretimi	Sığır gübresi	[146]
600 W/L	% 40 daha fazla biyogaz üretimi	Çöp sızıntı suları	[147]
130 W ve 30 dakika	% 10,12 daha fazla biyogaz üretimi	Tavuk gübresi	[148]
60 W ve 50 mL	% 84 daha fazla biyogaz üretimi	Lağım çamuru atığı	[149]
360 kJ/L ve 30 dakika	% 31 daha fazla metan üretimi	Lağım çamuru atığı	[150]
200 W ve 100 mL	% 6,3 daha fazla biyogaz üretimi	Atıksu arıtma çamuru	[151]
100 W ve 900 mL	% 32 daha fazla biyogaz üretimi	Aktif çamur	[152]

Çizelge 7.9’da organik maddeye ultrases ön işlem uygulanması sonucu biyogaz üretimi üzerindeki artışların literatür değeriyle karşılaştırılması verilmiştir. Güncel literatürde en yüksek biyogaz üretimi referans [149]’da % 84 oranında daha fazla meydana gelmiştir. Referans [149]’ da çalışmada 1,2 W/ml uygulanan atık organik madde içeren sulu karışım suda çözdürülmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada ise 0,4 W/ml lik daha düşük bir ultrases dalga şiddeti uygulanarak daha yüksek verim elde edilmiştir. Bunun nedeni ise ultrases dalgasının organik numuneleri suda çözme gücünün organik maddelerin cinsine göre değişiklik gösterdiğinin kanıtıdır. Buna benzer şekilde referans [151]’de 2 W/ml olan çalışmada sadece % 6,3 daha fazla biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Ultrases dalga şiddeti artmasına rağmen biyogaz üretimi güncel çalışmalara göre çok az artış göstermiştir.

## 8. ÖN İŞLEMLER UYGULANARAK ÜRETİLEN BİYOGAZIN İSTATİSTİKSEL ANLAMDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesinin kütlece 2:1:1 oranında olan karışımlarına sırasıyla termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultrases dalgası ön işlemleri uygulanmıştır. Bu ön işlemler sonucunda oluşan biyogaz üretim verimleri SPSS programı ile istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Verilerin normallik testleri yapılarak normal dağılım sergiledikleri anlaşılmıştır. Organik numune karışımı sonucunda uygulanan her bir ön işleme one-way ANOVA testi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda istatistiksel olarak farklı çıkan bağımsız değişkenlere Tukey testi yapılarak farklılığın hangi gruptan kaynaklığı gösterilmiştir. Farklı ön işlem koşulları altında biyogaz üretim hızı bağımlı değişken, ön işlem çeşitleri (termal-alkali-asit-termokimyasal-ultrases) bağımsız değişken ve ön işlem miktarları (uygulanma süresi ya da çözelti miktarı) ise bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır. Analiz sonucunda alkali ve asit ön işlem sonuçlarının homojen dağılım sergiledikleri ve farklı miktarlarda ön işlem uygulanan reaktörlerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıklarının oluşmadığı belirlenmiştir. Asit ve alkali ön işlemler dışındaki ön işlemler için biyogaz üretimi üzerindeki etkisi % 5 anlamlılık düzeyinde test edilmiş ve  $p = 0,01$  olarak bulunmuştur. Anlamlılık düzeyi  $p < 0,05$  olduğu için ön işlem koşullarının biyogaz üretim hızı üzerinde anlamlı farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.10'da anlamlı farkların olduğu ön işlemlerin biyogaz üretimi üzerindeki tahmin edilen ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. Bunlar:

- Termal ön işlemler için % 95 güven aralığında 20 adet reaktör için alt değer 238,72 ml/g KM, üst değer 278,45 ml/g KM,
- Termokimyasal ön işlemler için % 95 güven aralığında 20 adet reaktör için alt değer 289,23 ml/g KM, üst değer 342,08 ml/g KM,.
- Ultrases dalgası ön işlemleri için % 95 güven aralığında 30 adet reaktör için alt değer 217,72 ml/g KM, üst değer 235,20 ml/g KM,

değerleri belirlenmiştir. Buna göre alt değer ve üst değer aralığında kalan reaktörler ideal reaktörler olarak tanımlanabilmektedir. Bu reaktörler; R<sub>22</sub>, R<sub>23</sub>, R<sub>24</sub>, R<sub>27</sub>, R<sub>32</sub>, R<sub>34</sub>, R<sub>36</sub>, R<sub>63</sub>, R<sub>66</sub>, R<sub>67</sub>, R<sub>68</sub>, R<sub>78</sub>, R<sub>79</sub>, R<sub>92</sub>, R<sub>100</sub>, R<sub>101</sub>, R<sub>102</sub> ve R<sub>104</sub> olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 7.10** Ön işlem koşullarının biyogaz üretimi üzerinde istatistiksel değerlendirilmesi  
Bağımlı değişken: biyogaz üretimi (ml/g KM)

Ön işlemler	Grup sayısı	Ortalama	Standart sapma	95 % güven aralığı	
				Alt değer	Üst değer
Termal ön işlemler	20	257,63	47,03	238,72	278,45
Termokimyasal ön işlemler	20	315,19	63,28	289,23	342,08
Ultrases dalgası ön işlemleri	30	226,48	24,04	217,72	235,20

Çizelge 7.11’de termal ön işlem sıcaklıklarının biyogaz üretim hızı üzerinde istatistiksel çoklu karşılaştırma tablosu verilmiştir. Tukey testi sonucunda farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığı gösterilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde 100 °C, 120 °C ve 150 °C ön işlem sıcaklıklarının istatistiksel olarak kendi aralarında anlamlı bir farklılık göstermediği fakat 180 °C termal ön işlem sıcaklığı diğer termal ön işlem sıcaklıklarına göre biyogaz üretimi açısından istatistiksel yönde anlamlı bir farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.12’de 180 °C ön işlem sıcaklığının 100, 120 ve 150 °C’ deki diğer ön işlem sıcaklıklarına göre bütün termal ön işlem süreleri altında anlamlı bir farklılık gösterdiği görülmüştür. Buna göre 100, 120 ve 150 °C ön işlem uygulanan reaktörler arasında anlamlı ve ideal ön işlem sıcaklığı 100 °C olarak kabul edilmiştir.

**Çizelge 7.11** Termal ön işlem sıcaklıklarının biyogaz üretim hızı üzerindeki tukey testi  
Tukey HSD<sup>a,b</sup>

Termal ön işlem sıcaklıkları	Gözlem sayısı	Gruplar	
		1	2
100 °C	5	228,82	
120 °C	5	245,98	
150 °C	5	251,78	
180 °C	5		303,96
p		0,377	1,000

Çizelge 7.12’de termokimyasal ön işlem sıcaklıklarının biyogaz üretim hızı üzerinde istatistiksel çoklu karşılaştırma tablosu verilmiştir. Çizelge 7.12 incelendiğinde katı kütlesinin % 5, % 10 ve % 15’inin kendi aralarında bütün termokimyasal ön işlem sıcaklıkları altında herhangi bir anlamlı farklılıkların olmadığı belirtilenmiştir. Reaktördeki katı kütlesinin % 10, % 15 ve % 30’u kadar eklenen çözelti miktarlarının bütün

termokimyasal ön işlem sıcaklıkları koşullarında anlamlı farklılıkların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde reaktördeki katı kütlelerinin % 15, % 30 ve % 20'si kadar eklenen çözelti miktarlarının bütün termokimyasal ön işlem sıcaklıkları koşullarında anlamlı farklılıkların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Buna göre termokimyasal ön işlem koşulları çözelti miktarları katı kütlelerinin % 5, % 10 ve % 15'i ile yapılan çalışmalarda ön işlem maliyetleri açısından % 5'in seçilmesi daha anlamlı olacaktır. Aynı şekilde termokimyasal ön işlem koşulları çözelti miktarları katı kütlelerinin % 10, % 15 ve % 30 arasından % 10'un seçilmesi daha anlamlı olacaktır. Benzer şekilde termokimyasal ön işlem koşullarında çözelti miktarları katı kütlelerinin % 15, % 30 ve % 20 arasında yapılan çalışmalar arasından % 15'in seçilmesi daha anlamlı olacaktır.

**Çizelge 7.12** Termokimyasal ön işlem sürelerinin biyogaz üretim hızı üzerindeki tukey testi

**Tukey HSD<sup>a,b</sup>**

Termokimyasal ön işlem miktarları	Gözlem sayısı	Gruplar		
		1	2	3
katı kütlelerinin % 5'i	4	199,32		
katı kütlelerinin % 10'u	4	222,57	222,57	
katı kütlelerinin % 15'i	4	249,15	249,15	249,15
katı kütlelerinin % 30'u	4		263,85	263,85
katı kütlelerinin % 20'si	4			281,02
p		0,071	0,169	0,383

Çizelge 7.13'te termokimyasal ön işlem sıcaklıklarının biyogaz üretim hızı üzerinde istatistiksel çoklu karşılaştırma tablosu verilmiştir. Çizelge 7.13 incelendiğinde 5,10 ve 20 kj ultrases dalgası ön işlemlerinin kendi aralarında anlamlı bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Ultrases dalgası ön işlemleri ile yapılan çalışmalarda 20 ve 50 kj ultrases dalgasının kendi aralarında anlamlı bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 50 ve 100 kj dalga şiddeti çalışmalarının bütün ultrases dalga ön işlem süreleri altında anlamlı bir sonuç oluşturmadığı gözlemlenmiştir. 100 ve 30 kj ultrases dalga şiddetleri ile yapılan çalışmalarda bütün ön işlem sürelerinin kendi aralarında anlamlı bir farklılık oluşturmadığı gözlemlenmiştir.

Buna göre 5-10 ve 20 kj ultrases dalgası şiddeti ile yapılan ön işlem çalışmalarında ön işlem maliyeti açısından 5 kj ideal ön işlem şiddeti olarak belirlenebilmektedir. 20 ve 50 kj ultrases dalgası şiddeti ile bütün ultrases dalga süreleri altında yapılan ön işlem çalışmalarında ön işlem maliyeti açısından 20 kj ideal ön işlem şiddeti olarak belirlenmiştir. 100 ve 30 kj ultrases dalgası şiddeti ile bütün ultrases dalga süreleri altında

yapılan ön işlem çalışmalarında ön işlem maliyeti açısından 30 kj ideal ön işlem şiddeti olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 7.13** Ultrases dalgası ön işlem koşullarının biyogaz üretimi üzerindeki tukey testi  
**Tukey HSD<sup>a,b</sup>**

Ultrases dalga şiddetleri	Gözlem sayısı	Gruplar			
		1	2	3	4
5 kj	5	200,74			
10 kj	5	203,56			
20 kj	5	214,78	214,78		
50 kj	5		231,46	231,46	
100 kj	5			249,14	249,14
30 kj	5				259,24
p		0,204	0,087	0,062	0,538

## 9. ÖN İŞLEMLER UYGULANARAK ÜRETİLEN BİYOGAZIN MODELLENMESİ

Çizelge 7.14 Çeşitli ön işlem koşullarında maksimum biyogaz üreten reaktörler

Termal ön işlemler					
Ön işlem sıcaklığı (°C)	Ön işlem süresi (dk)	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
100	60	R <sub>23</sub>	255,5	41,5	68,0
120	120	R <sub>29</sub>	288,1	59,6	70,0
150	60	R <sub>33</sub>	280,0	55,1	68,1
180	60	R <sub>38</sub>	362,1	100,6	80,1
Alkali ve asit ön işlemler					
Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı ( reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
8 N NaOH	20	R <sub>43</sub>	288,7	59,9	69,0
8 N KOH	15	R <sub>47</sub>	301,2	66,8	73,1
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20	R <sub>53</sub>	258,5	43,2	66,1
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	20	R <sub>58</sub>	301,4	66,9	71,2
Termokimyasal ön işlemler					
Ön işlem çözeltileri	Ön işlem miktarı ( reaktör içindeki katı kütlesinin % miktarı)	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
8 N NaOH	15	R <sub>72</sub>	398,5	120,7	85,9
8 N KOH	10	R <sub>76</sub>	458,4	153,9	87,1
Kütlece % 15'lik H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	R <sub>66</sub>	323,4	79,1	72,1
Kütlece % 15'lik HNO <sub>3</sub>	10	R <sub>61</sub>	355,6	97,0	75,4
Ultrases Dalgası ön işlemleri					
Ultrases dalga şiddeti (kj)	Ultrases dalga süresi	Reaktör adı	Biyogaz üretim hızı (ml/g KM)	% Fazla üretim	% KOİ giderimi
5	30	R <sub>83</sub>	211,5	17,1	59,0
10	60	R <sub>89</sub>	212,4	17,6	59,1
20	20	R <sub>92</sub>	222,5	23,2	62,1
30	20	R <sub>97</sub>	275,4	52,5	68,9
50	30	R <sub>103</sub>	235,9	30,6	63,2
100	20	R <sub>107</sub>	270,6	49,9	67,0



Çizelge 7.14'te termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultrases dalga ön işlemlerin uygulandığı reaktörler arasından maksimum verim elde edilen ön işlem koşulları seçilmiştir. Bu reaktörler R<sub>23</sub>, R<sub>29</sub>, R<sub>33</sub>, R<sub>38</sub>, R<sub>43</sub>, R<sub>47</sub>, R<sub>53</sub>, R<sub>58</sub>, R<sub>61</sub>, R<sub>66</sub>, R<sub>72</sub>, R<sub>76</sub>, R<sub>83</sub>, R<sub>89</sub>, R<sub>92</sub>, R<sub>97</sub>, R<sub>103</sub> ve R<sub>107</sub> olarak belirlenmiştir. İstatistiksel analizler ile Bertalanffy ve Logistic modeller bu reaktörler için ayrı ayrı uygulanmıştır.

Anaerobik fermantasyonda mikroorganizmaların çoğalma hızı ile biyogaz üretim hızı doğru orantılıdır. Bu bağlamda büyüme eğrilerinden, büyüme eğrisi parametrelerinin hesaplanmasında SPSS programı kullanılmıştır. 5 günde bir ölçülen kümülatif biyogaz üretim hızı programda yerine yazılarak Logistic ve Bertalanffy modelleri için tahminlenen değerler elde edilmiştir. Mekanik modele dönüşüm için birinci ve ikinci türevler yardımıyla biyolojik anlamlı parametreler elde edilebilmektedir [161]. Belirleme katsayıları (R<sup>2</sup>) değerleri en yüksek olan model en uygun model olarak seçilmiştir. Ayrıca mekanik modele dönüşüm için birinci ve ikinci türevler yardımıyla biyolojik anlamlı parametreler elde edilmiştir.

**Çizelge 7.15** Büyüme eğrilerini tahmin etmede kullanılan Sigmoidal modeller ve denklemleri

Model isimleri	Denklemler
Logistic	$y = \frac{a}{1+e^{(b-ct)}}$
Bertalanffy	$y = a[1 - be^{-ct}]^3$

Bu modellerde yer alan;

y: t zamanındaki büyüklük,

t: Zaman,

a: Asimptotik büyüklük

c: Büyüme sabiti

b: Canlının başlangıç büyüme sabiti

e: 2,71828 değerlerini ifade etmektedir.

Bu denklemlerin sigmoidal biyogaz üretim hızına göre modifiye edilmiş hali çizelge 7.16' da verilmiştir.

**Çizelge 7.16** Modifiye edilmiş Bertalanffy ve Logistic modelleri

Model isimleri	Denklemler
Logistic	$y = \frac{A}{\left[1 + e^{\frac{4\mu_m(\lambda-t)}{A} + 2}\right]}$
Bertalanffy	$y = -\frac{1}{27}A \left[ -3 + e^{\frac{2}{3} + \frac{9\mu_m(\lambda-t)}{4A}} \right]^3$

Bu denklemlerde;

$A$ : Maksimum biyogaz üretim miktarı (ml/g KM)

$\lambda$  : Gecikme süresi (gün)

$\mu_m$ : Spesifik biyogaz üretim hızı (ml/g KM.gün)

olarak tanımlanmıştır.

**Çizelge 7.17** Modifiye edilmiş Logistic ve Bertalanffy sabitleri

Logistic			Bertalanffy		
$\lambda$	$\mu_m$	$A$	$\lambda$	$\mu_m$	$A$
$\frac{b-2}{c}$	$\frac{ac}{4}$	a	$\frac{\ln(3b) - \frac{2}{3}}{c}$	$\frac{4ac}{9}$	a

Çizelge 7.17’de modifiye edilmiş denklemlerinde bulunan maksimum biyogaz üretim hızı ( $A$ ), gecikme fazı ( $\lambda$ ) ve spesifik biyogaz üretim hızı ( $\mu_m$ ) çizelge 7.15’teki denklemlerdeki sabitler cinsinden verilmiştir.

**Çizelge 7.18** Modifiye edilmiş Logistic ve Bertalanffy denklemlerinin deneyisel veriler ile belirlenmiş sabitleri

Maksimum sonuç veren reaktörler	Logistic model				Bertalanffy model			
	$\lambda$ (gün)	$\mu_m$ (ml/g KM.gün)	A (ml/g KM)	R <sup>2</sup>	$\lambda$ (gün)	$\mu_m$ (ml/g KM.gün)	A (ml/g KM)	R <sup>2</sup>
R <sub>13</sub>	13,545	4,016	182,556	0,996	9.712	3,620	220,154	0,998
R <sub>23</sub>	6,137	9,352	271,080	0,995	3,654	8,281	351,580	0,999
R <sub>29</sub>	6,566	10,539	309,966	0,995	3,901	9,099	417,783	0,997
R <sub>33</sub>	5,540	10,234	298,813	0,994	3,054	8,928	386,302	0,997
R <sub>38</sub>	4,478	11,923	400,779	0,985	2,098	10,535	538,728	0,993
R <sub>43</sub>	7,447	9,962	323,958	0,992	4,901	8,546	493,078	0,992
R <sub>47</sub>	6,747	8,960	362,022	0,979	4,528	8,301	667,069	0,990
R <sub>53</sub>	6,686	9,693	276,941	0,994	4,211	8,590	357,921	0,997
R <sub>58</sub>	6,013	12,139	315,286	0,994	3,926	10,892	377,027	0,997
R <sub>61</sub>	7,221	14,594	379,064	0,996	4,685	12,672	475,188	0,995
R <sub>66</sub>	9,524	14,378	350,662	0,995	6,682	11,958	456,014	0,987
R <sub>72</sub>	8,753	16,281	434,175	0,994	6,186	14,154	568,695	0,994
R <sub>76</sub>	9,438	19,278	504,010	0,996	6,682	16,006	692,585	0,991
R <sub>83</sub>	5,414	9,469	209,257	0,995	4,235	9,399	220,300	0,996
R <sub>89</sub>	4,200	9,479	210,642	0,991	2,928	9,398	220,276	0,990
R <sub>92</sub>	4,872	11,586	211,613	0,992	4,025	11,522	219,700	0,996
R <sub>97</sub>	5,162	10,516	262,897	0,988	3,705	10,041	285,989	0,995
R <sub>103</sub>	5,010	11,920	232,577	0,997	3,898	11,730	242,128	0,996
R <sub>107</sub>	4,597	8,350	280,696	0,990	2,373	7,768	323,684	0,995

Çizelge 7.18’de Modifiye Logistic ve Modifiye Bertalanffy model denklemlerinin deneysel verilerden hesaplanan model sabitleri verilmiştir. Yapılan bu çalışmada ön işlemsiz ve bütün ön işlemlili çalışmaların optimum reaktörleri seçilmiştir. Buna göre ön işlemsiz biyogaz üretim çalışmalarında optimum sonuç, R<sub>13</sub> isimli reaktörde meydana gelmiştir. Termal ön işlem çalışmalarında:

- 100 °C termal ön işlem çalışmalarında 60 dk ön işlem süresinin uygulandığı reaktör R<sub>23</sub>,
- 120 °C’de ve 120 dakika ön işlem uygulanan reaktör R<sub>29</sub>, 150 °C’de ve 60 dakika ön işlem uygulanan reaktör R<sub>33</sub>,
- 180 °C’de ve 60 dakika ön işlem uygulanan reaktör R<sub>38</sub> olarak isimlendirilmiştir.

Alkali ön işlem çalışmalarında:

- katı kütlesinin % 20'si kadar 8N NaOH eklenen reaktör R<sub>43</sub>,
- katı kütlesinin % 15'i kadar 8N KOH eklenen reaktör R<sub>47</sub> olarak isimlendirilmiştir.

Asit ön işlem çalışmalarında:

- katı kütlesinin % 20'si kadar kütlece % 15'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> eklenen reaktör R<sub>53</sub>,
- katı kütlesinin % 20'si kadar kütlece % 15'lik HNO<sub>3</sub> eklenen reaktör R<sub>58</sub> olarak isimlendirilmiştir.

Termokimyasal ön işlem çalışmalarında:

- katı kütlesinin % 10'u kadar % 15'lik H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve 100 °C'de yapılan çalışma R<sub>61</sub>,
- katı kütlesinin % 10'u kadar % 15'lik HNO<sub>3</sub> ve 100 °C'de yapılan çalışmada R<sub>66</sub>,
- katı kütlesinin % 15'i kadar 8 N NaOH ve 100 °C'de yapılan çalışma R<sub>72</sub>,
- katı kütlesinin % 10'u kadar 8 N KOH ve 100 °C'de yapılan çalışma R<sub>76</sub> olarak isimlendirilmiştir.

Ultrases dalgası ön işlem çalışmalarında ise:

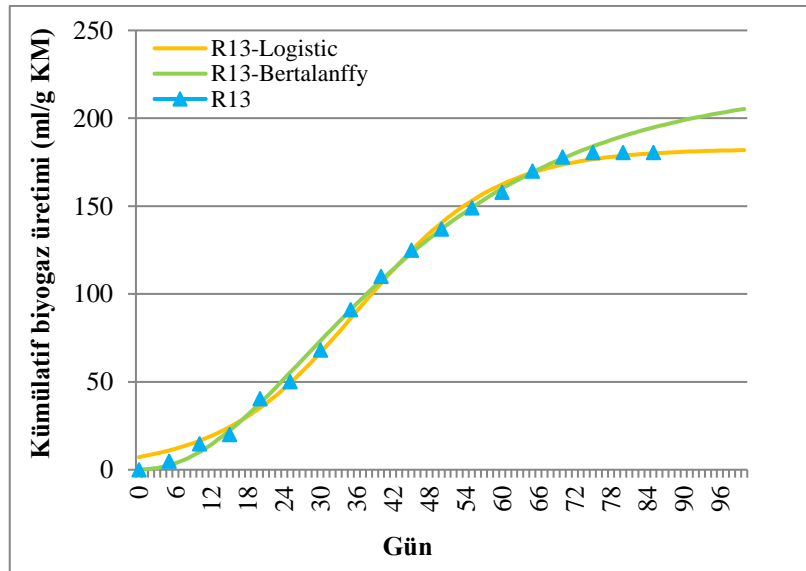
- 5 kj ve 30 dakika uygulanan reaktör R<sub>83</sub>,
- 10 kj ve 60 dakika uygulanan reaktör R<sub>89</sub>,
- 20 kj ve 20 dakika ultrases uygulanan reaktör R<sub>92</sub>,
- 30 kj ve 20 dakika ultrases uygulanan reaktör R<sub>97</sub>,
- 50 kj ve 30 dakika ultrases uygulanan reaktör R<sub>103</sub>,
- 100 kj ve 20 dakika ultrases uygulanan reaktör ise R<sub>107</sub> olarak isimlendirilmiştir.

Bu çalışmada 109 reaktör arasından en yüksek biyogaz üretim hızının olduğu reaktörler dikkate alınarak sigmoidal büyüme modellerinden Logistic ve Bertalanffy modellerine uygunluğu araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda Logistic model için belirleme katsayıları olan R<sup>2</sup> değerleri en az 0,979 ve en fazla 0,996 olarak, Bertalanffy model için R<sup>2</sup> değerleri en az 0,990 ve en fazla 0,996 olarak bulunmuştur. Genel olarak Bertalanffy modelinin R<sup>2</sup> değerleri Logistic modelin R<sup>2</sup> değerlerinden yüksek çıkmıştır. En yüksek biyogaz üretim verimleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modeli, Logistic modeline göre daha uygundur.

Çizelge 7.18’de  $A$  değerleri maksimum biyogaz üretim miktarlarını ifade etmektedir.  $R_{13}$  ve  $R_{107}$  ele alındığında biyogaz üretim miktarları sırasıyla 180,5 ve 270,6 ml/g KM’dir. Fakat Logistic modelinin maksimum biyogaz üretim miktarı için tahmin ettiği değerler sırasıyla 182,556 ve 280,696 ml/g KM’ dir. Benzer şekilde Bertalanffy modelinin tahmin ettiği maksimum biyogaz üretimleri 220,154 ve 323,684 ml/g KM’ dir. Logistic modeli ve Bertalanffy modelinin tahmin ettiği maksimum biyogaz üretim miktarları, gerçek biyogaz üretim hızlarına paralel olarak sırasıyla en yüksek 504,010 ve 692,585 ml/g KM olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.18’de Logistic modelin gecikme süreleri ( $\lambda$ ) Bertalanffy modele göre daha yüksek çıkmıştır. Logistic modelde en yüksek değer  $R_{13}$ ’te 13,545 gün olarak meydana gelirken en düşük değer  $R_{89}$ ’da 4,200 gün olarak meydana gelmiştir. Bertalanffy modelde en yüksek değer  $R_{13}$ ’te 9,712 gün olarak meydana gelirken en düşük değer  $R_{107}$ ’de 2,373 gün olarak meydana gelmiştir.

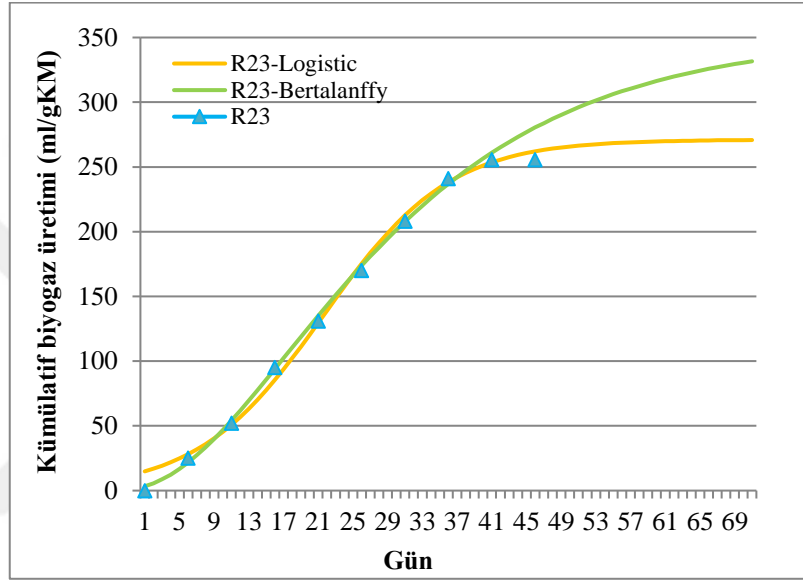
Çizelge 7.18’de Logistic modelin spesifik biyogaz üretim hızı ( $\mu_m$ ) en düşük  $R_{13}$ ’te 4,016 ml/g KM.gün ve en yüksek  $R_{76}$ ’da 19,278 ml/g KM.gün olarak meydana gelmiştir. Bertalanffy modelde ise spesifik biyogaz üretim hızı ( $\mu_m$ ) en düşük  $R_{13}$ ’te 3,620 ml/g KM.gün ve en yüksek  $R_{76}$  ‘da 16,006 ml/g KM.gün olarak meydana gelmiştir.



Şekil 7.1  $R_{13}$  reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

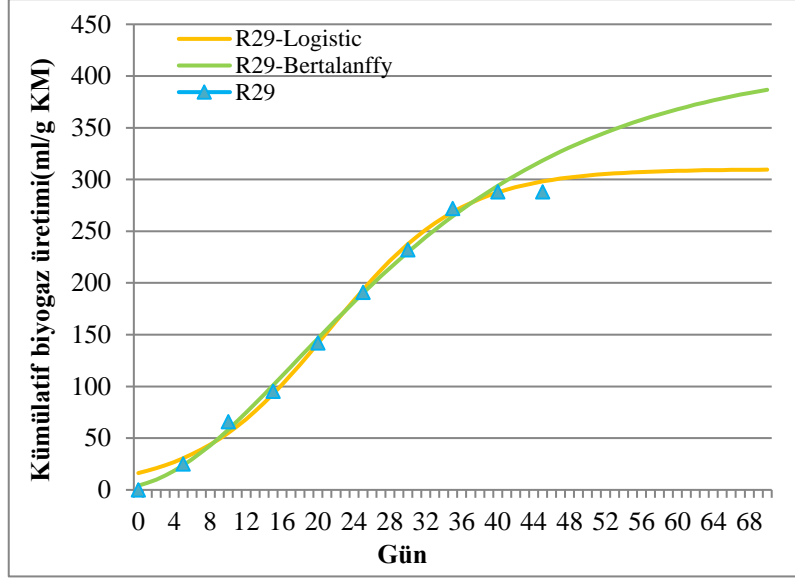
Şekil 7.1’de  $R_{13}$  reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte  $R_{13}$  gerçek değerleri,  $R_{13}$ -Logistic ise gerçek değerlerden elde edilen logistic model değerlerini ve  $R_{13}$ -Bertalanffy’de gerçek değerlerden yola çıkarak

elde edilen Bertalanffy model eğrisini göstermektedir. Bertalanffy modelin  $R^2$  değeri 0,998 iken Logistic modelin  $R^2$  değeri 0,996 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic eğrisinde gecikme süresi 13,545 gün iken Bertalanffy eğrisinde 9,712 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden Bertalanffy model Logistic modele göre daha uyumlu davranmıştır. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 182,556 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 220,154 ml/g KM değerindedir.



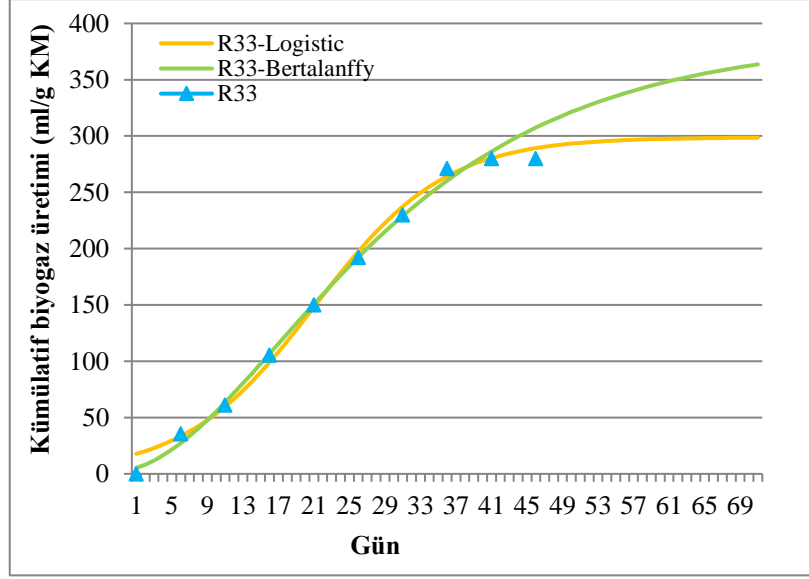
Şekil 7.2 R<sub>23</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.2'de R<sub>23</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte R<sub>13</sub> gerçek değerleri, R<sub>23</sub> - Logistic ise gerçek değerlerden elde edilen logistic model değerlerini ve R<sub>23</sub> - Bertalanffy de gerçek değerlerden yola çıkarak elde edilen Bertalanffy model eğrisini göstermektedir. Bertalanffy modelin  $R^2$  değeri 0,999 iken Logistic modelin  $R^2$  değeri 0,995 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 6,137 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,654 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 271,080 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 351,580 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.3 R<sub>29</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

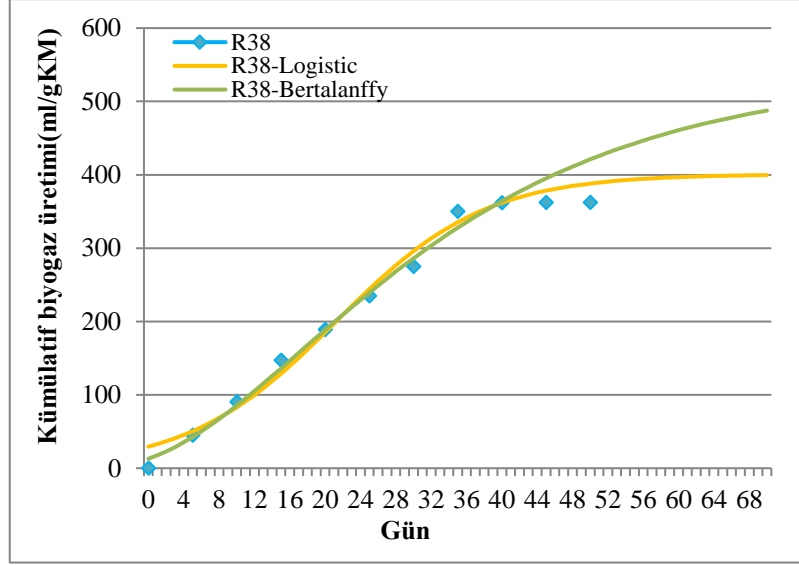
Şekil 7.3'te R<sub>29</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte R<sub>29</sub> gerçek değerleri, R<sub>29</sub> - Logistic ise gerçek değerlerden elde edilen logistic model değerlerini ve R<sub>29</sub> - Bertalanffy de gerçek değerlerden yola çıkarak elde edilen Bertalanffy model eğrisini göstermektedir. Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,997 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 6,566 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,901 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 309,966 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 417,783 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.4 R<sub>33</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

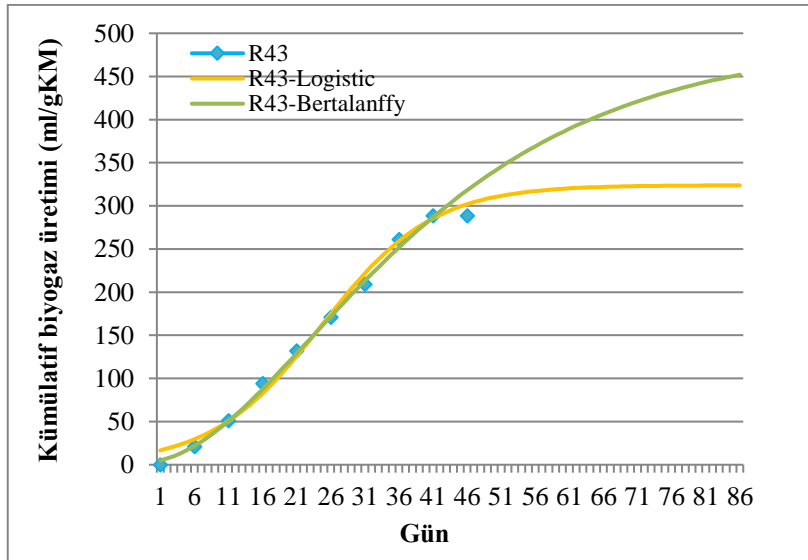
Şekil 7.4'te R<sub>33</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte R<sub>33</sub> gerçek değerleri, R<sub>13</sub> - Logistic ise gerçek değerlerden elde edilen logistic model değerlerini ve R<sub>33</sub> - Bertalanffy de gerçek değerlerden yola çıkarak elde edilen Bertalanffy model eğrisini göstermektedir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 5,540 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,054 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 298,813 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 386,302 ml/g KM değerindedir. Bu bağlamda gerçek maksimum biyogaz üretim hızı R<sub>33</sub> reaktörü için 280 ml/g KM olduğundan Logistic model eğrisi daha gerçekçi bir yaklaşıma sahip olmuştur. R<sub>29</sub>'da gerçek biyogaz üretim hızı gerçek biyogaz üretim hızı R<sub>33</sub> reaktörüne benzer değerde (288,1 ml/g KM) olmasına rağmen Bertalanffy denklemde 417,783 ml/g KM ve Logistic denklemde ise 309,966 olarak bulunmuştur.





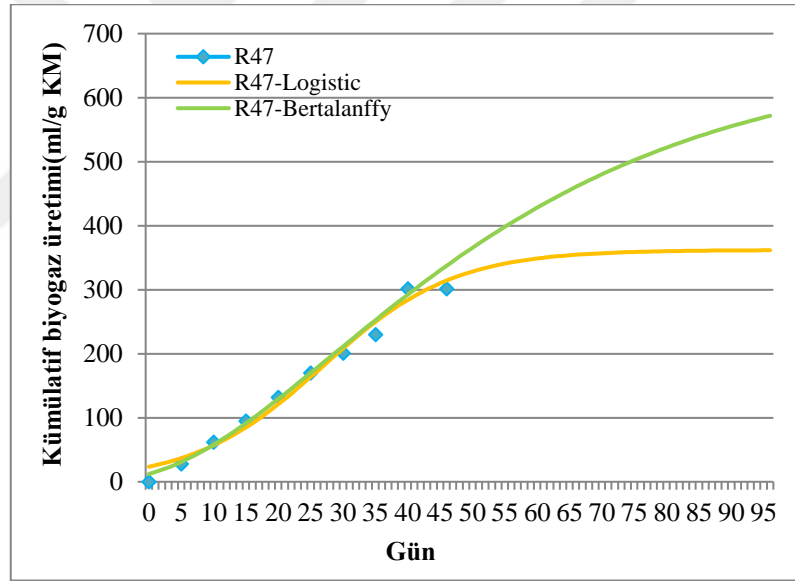
Şekil 7.5 R<sub>38</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.5'te R<sub>38</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,993 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,985 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 4,478 gün iken Bertalanffy eğrisinde 2,098 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 400,779 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 538,728 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.6 R<sub>43</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

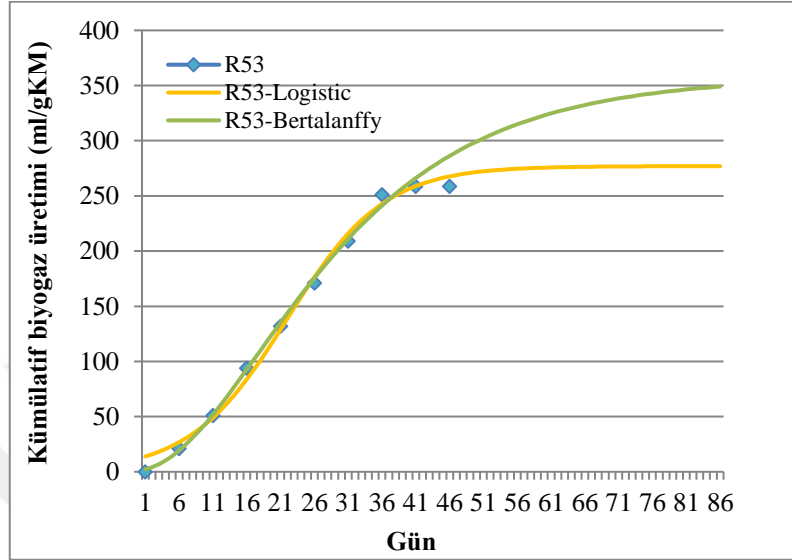
Şekil 7.6'da R<sub>43</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte gerçek değerler, Bertalanffy model değerleri ve Logistic model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Logistic model ve Bertalanffy model eğrilerinin R<sup>2</sup> değeri 0,992 olarak belirlenmiştir. Bu uyum değerleri eşit olmasına karşın Bertalanffy model eğrisinin maksimum biyogaz üretim hızı 493,078 ml/g KM iken Logistic model eğrisinde maksimum biyogaz üretim hızı 323,958 ml/g KM olarak bulunmuştur. Bu bağlamda gerçek maksimum biyogaz üretim hızı R<sub>38</sub> reaktörü için 368,1 ml/g KM olduğundan Logistic model eğrisi daha gerçekçi bir yaklaşıma sahip olmuştur. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 7,447 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,901 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 7.7 R<sub>47</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

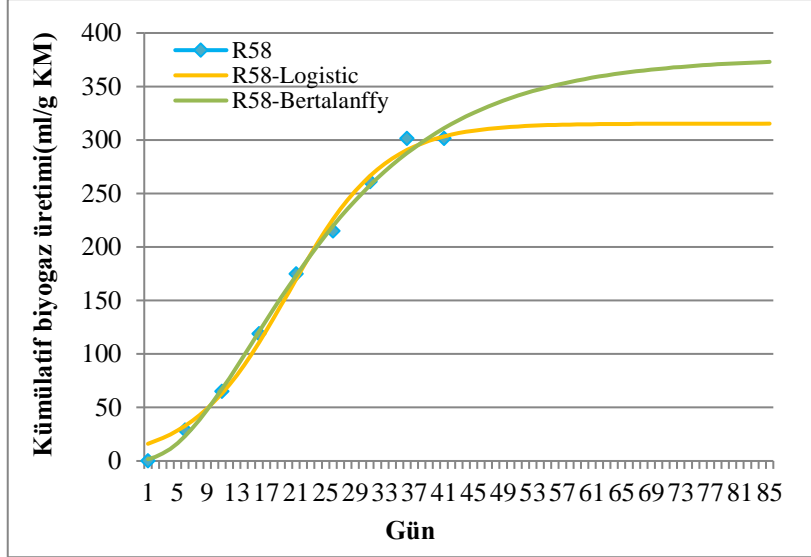
Şekil 7.7'de R<sub>47</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak verilmiştir. Bu grafikte gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,990 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,979 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 6,747 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,528 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha

uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 323,958 ml/g KM iken Bertalanffy modele göre 493,078 ml/g KM değerindedir. Bu bağlamda gerçek maksimum biyogaz üretim hızı R<sub>47</sub> reaktörü için 301,2 ml/g KM olduğundan Logistic model eğrisi daha gerçekçi bir yaklaşıma sahip olmuştur.



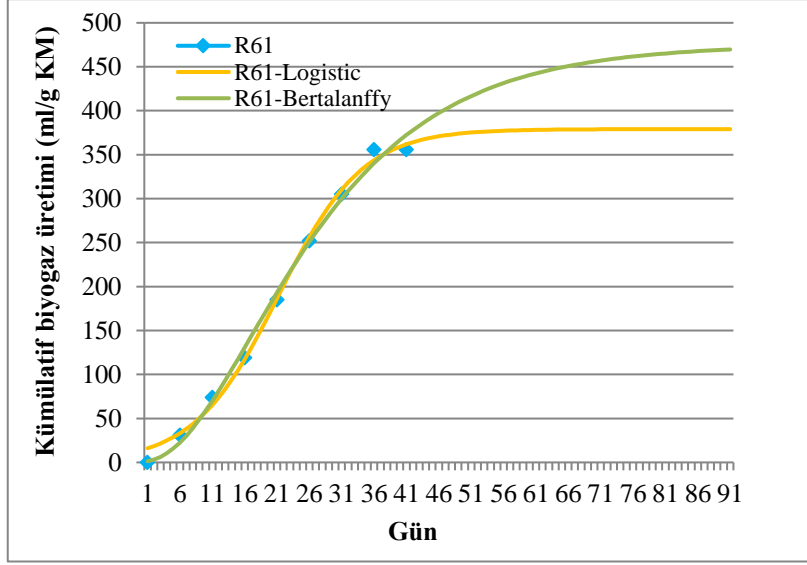
Şekil 7.8 R<sub>53</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.8'de R<sub>53</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,997 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,994 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 6,686 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,211 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 276,941 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 357,921 ml/g KM değerindedir.



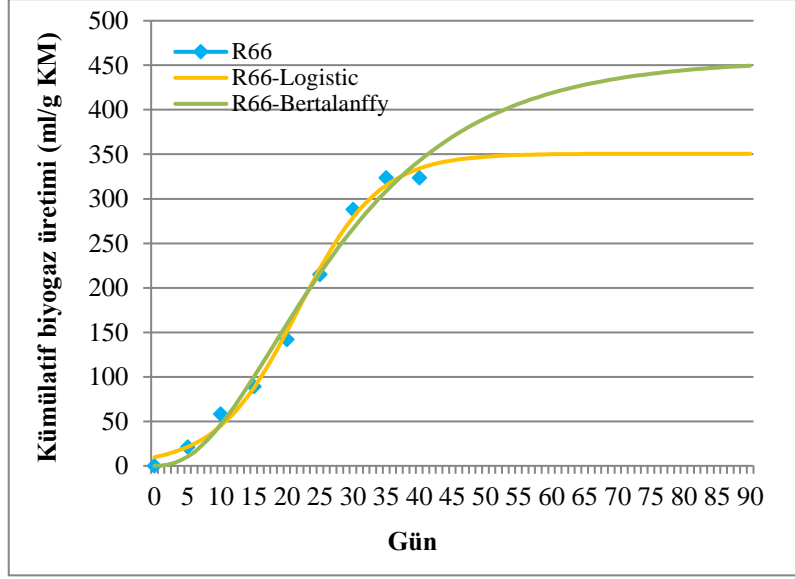
Şekil 7.9 R<sub>58</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.9'da R<sub>58</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,997 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,994 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 6,013 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,926 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 315,286 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 377,027 ml/g KM değerindedir. Bu bağlamda gerçek maksimum biyogaz üretim hızı R<sub>58</sub> reaktörü için 301,4 ml/g KM olduğundan Logistic model eğrisi daha gerçekçi bir yaklaşıma sahip olmuştur. R<sub>47</sub> reaktöründe gerçek biyogaz üretim hızı 301,2 ml/g KM iken R<sub>58</sub> reaktöründe 301,4 ml/g KM olarak bulunmuştur. Gerçek biyogaz üretim hızları bu iki reaktörde birbirine çok yakın değerler olmasına rağmen R<sub>58</sub> reaktörünün maksimum biyogaz üretim hızları Logistic ve Bertalanffy modelde daha düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle R<sub>58</sub> reaktörü R<sub>47</sub> reaktörüne göre hem Logistic model eğrisine hem de Bertalanffy model eğrisine göre daha fazla uyumlu olduğu söylenebilir.



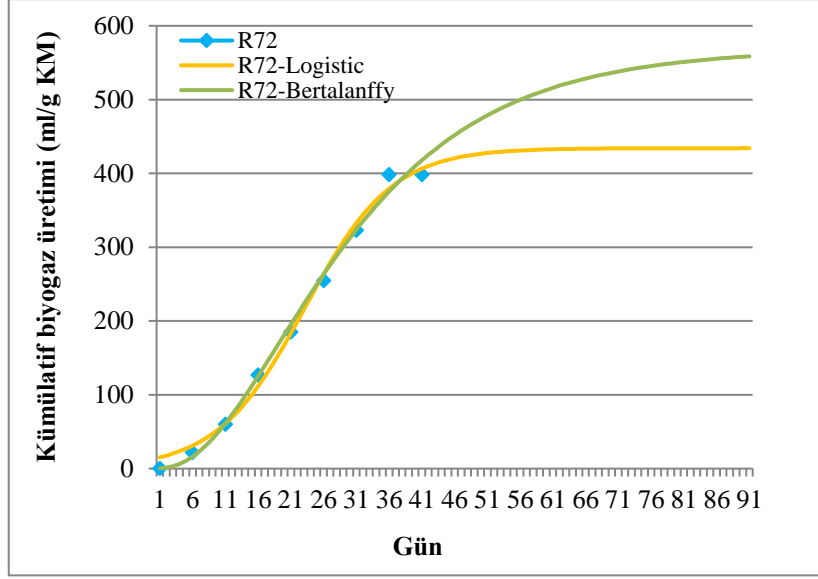
Şekil 7.10 R<sub>61</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.10’ da R<sub>61</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,996 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Logistic modelin Bertalanffy modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 7,221 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,685 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 379,064 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 475,188 ml/g KM değerindedir.



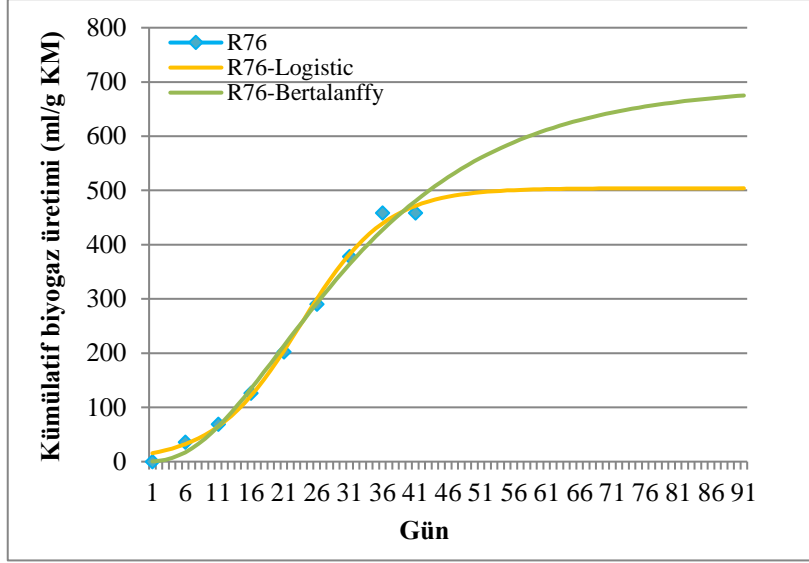
Şekil 7.11 R<sub>66</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.11’de R<sub>66</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,987 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Logistic modelin Bertalanffy modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 9,524 gün iken Bertalanffy eğrisinde 6,682 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 350,662 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 456,014 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.12 R<sub>72</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

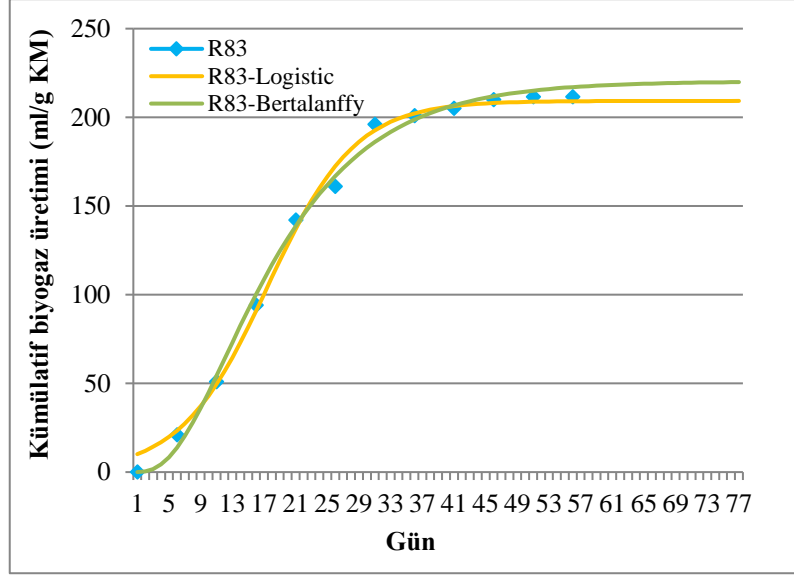
Şekil 7.12’de R<sub>72</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy model ve Logistic model eğrilerinin R<sup>2</sup> değeri eşit olup 0,994 olarak belirlenmiştir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 8,753 gün iken Bertalanffy eğrisinde 6,186 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görünmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde maksimum biyogaz üretimi 434,175 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 568,695 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.13 R<sub>76</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

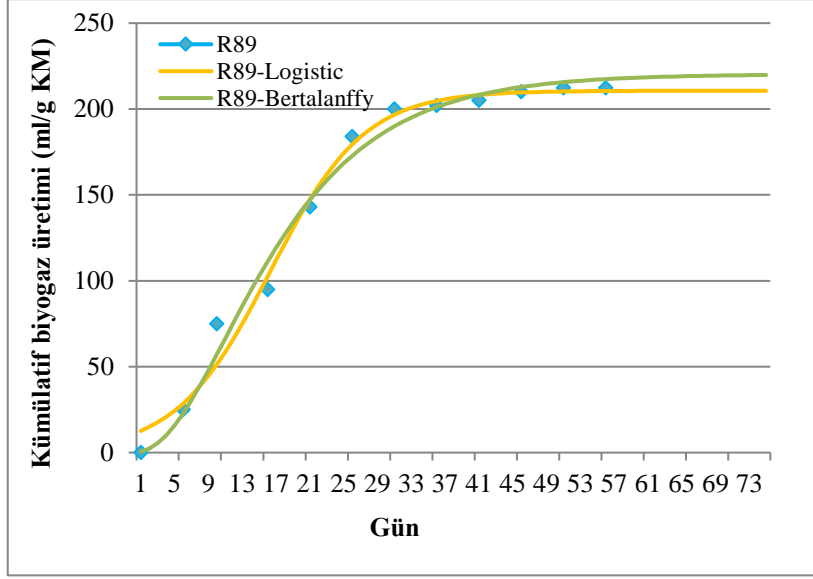
Şekil 7.13'te R<sub>76</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,991 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,996 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Logistic modelin Bertalanffy modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 9,438 gün iken Bertalanffy eğrisinde 6,682 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>76</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretimi 504,010 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 692,585 ml/g KM değerindedir.





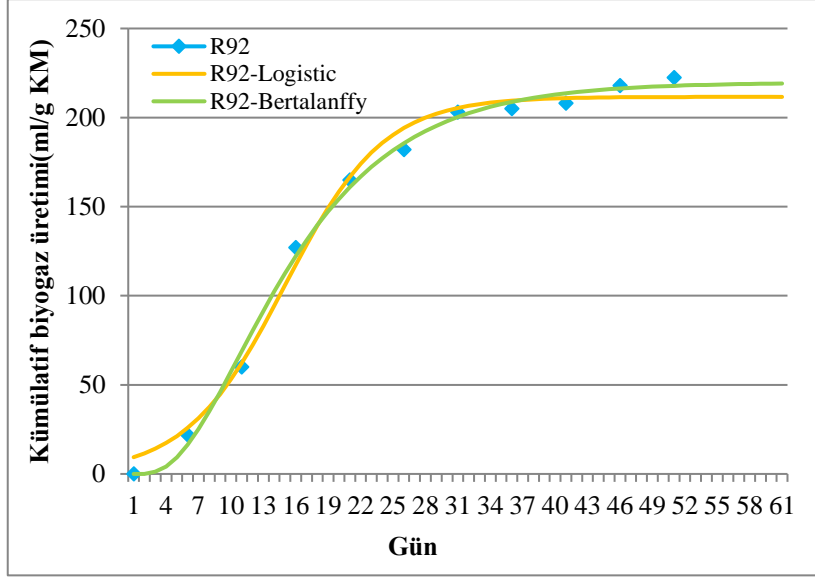
Şekil 7.14 R<sub>83</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.14'te R<sub>83</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,996 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 5,414 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,235 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>83</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretim miktarı 209,257 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 220,300 ml/g KM değerindedir.



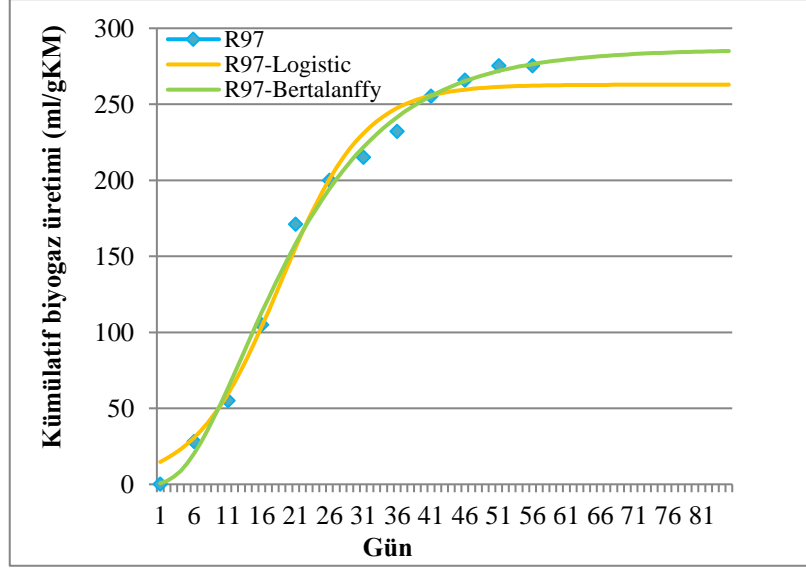
Şekil 7.15 R<sub>89</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.15'te R<sub>89</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,991 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,990 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu görülmektedir. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 4,200 gün iken Bertalanffy eğrisinde 2,928 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>89</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretim miktarı 210,642 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 220,276 ml/g KM değerindedir.



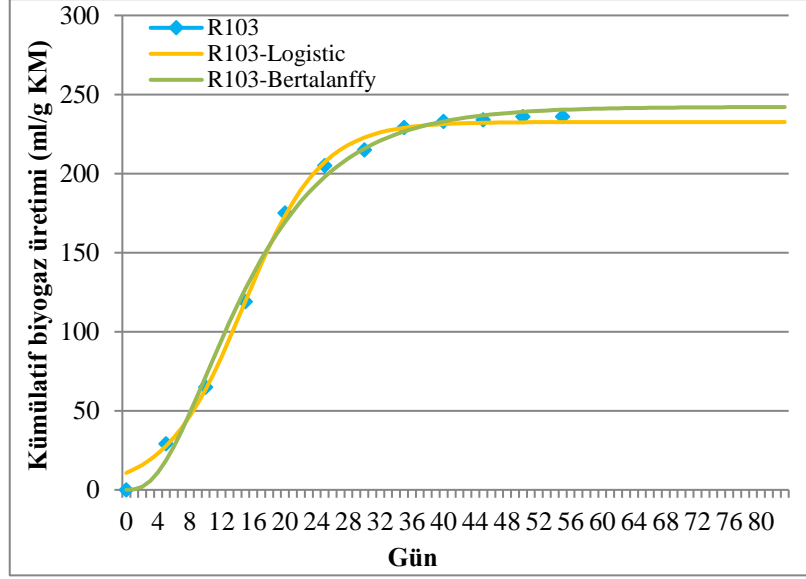
Şekil 7.16 R<sub>92</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.16'da R<sub>92</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,996 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,992 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu açıktır. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 4,872 gün iken Bertalanffy eğrisinde 4,025 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>92</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretimi 211,613 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 219,700 ml/g KM değerindedir.



**Şekil 7.17** R<sub>97</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.17'de R<sub>97</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,988 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu açıktır. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 5,162 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,705 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>97</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretimi 262,897 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 285,989 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.18 R<sub>103</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.18'de R<sub>103</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,996 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,987 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu açıktır. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 5,010 gün iken Bertalanffy eğrisinde 3,898 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>103</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretim miktarı 232,577 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 242,128 ml/g KM değerindedir.



Şekil 7.19 R<sub>107</sub> reaktörü için Bertalanffy ve Logistic eğrilerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması

Şekil 7.19'da R<sub>107</sub> reaktörü için kümülatif biyogaz üretim hızı zamana bağlı olarak gerçek değerler, Logistic model değerleri ve Bertalanffy model değerleri eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte Bertalanffy modelin R<sup>2</sup> değeri 0,995 iken Logistic modelin R<sup>2</sup> değeri 0,990 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak Bertalanffy modelin Logistic modele göre gerçek değerlere daha uyumlu olduğu açıktır. Logistic model eğrisinde gecikme süresi 4,597 gün iken Bertalanffy eğrisinde 2,373 gün olarak bulunmuştur. Genel olarak gecikme süresinin en az olması istendiğinden gecikme süreleri göz önünde bulundurulduğunda Bertalanffy modelin Logistic modele göre daha uyumlu olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Logistic modelde R<sub>107</sub> reaktörü için maksimum biyogaz üretimi 280,696 ml/g KM iken, Bertalanffy modele göre 323,684 ml/g KM değerindedir.

Şekil 7.1'den 7.19'a kadar olan bütün şekillerde ön işlemsiz ve ön işlem uygulanan reaktörlerin arasından maksimum sonuç veren reaktörler incelenmiştir. Bu reaktörlerin Bertalanffy model eğrileri, Logistic model eğrileri ve gerçek değerleri aynı grafikte gösterilmiştir. Logistic ve Bertalanffy denklemlerinde spesifik biyogaz üretim hızı her iki denklemden de doğru orantılı olarak gözlemlenmiştir. Genel olarak Logistic denklemden spesifik biyogaz üretim hızı Bertalanffy denklemindeki değerlerden daha yüksek bulunmuştur.

Logistic modelde ön işlemsiz R<sup>2</sup> değeri 0,996 olarak bulunmuştur. Logistic modelde:

- termal ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin R<sup>2</sup>ler ortalaması 0,992 olarak,

- alkali ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,986 olarak,
- asit ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,994 olarak,
- termokimyasal ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,995 olarak,
- ultrases dalgası ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,992 olarak belirlenmiştir.

$R^2$ ler dikkate alınırsa uygulanan ön işlemler arasında Logistic modele en fazla termokimyasal ön işlemler uyumluluk göstermiştir.

Bertalanffy modelde ön işlemsiz  $R^2$  değeri 0,998 olarak bulunmuştur. Bertalanffy modelde:

- termal ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,997 olarak,
- alkali ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,991 olarak,
- asit ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,997 olarak,
- termokimyasal ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,992 olarak
- ultrases dalgası ön işlem çalışmalarındaki maksimum sonuç veren reaktörlerin  $R^2$ ler ortalaması 0,995 olarak belirlenmiştir.

$R^2$ ler dikkate alınırsa uygulanan ön işlemler arasında Bertalanffy modele en fazla termokimyasal ön işlemler uyumluluk göstermiştir.

## 10. TARTIŞMA

Bu çalışmada hammadde olarak kullanılan sığır gübresi, mısır silajı ve şeker pancarı küspesinin kütlece 2:1:1 karışım oranına uygulanan termal, alkali, asidik, termokimyasal ve ultrases dalgası ön işlemleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Termal ön işlemler: Organik numunelerin çeşitli sıcaklık ve çeşitli sürelerde uygulanan ön işlemler arasından 120 °C’de ve 120 dakikada uygulanan termal ön işlem sonucunda biyogaz üretim hızı 288,1 ml/ g KM iken aynı sıcaklıkta 60 dakika ön işlem uygulanan reaktörde 285,5 ml/ g KM üretilmiştir. Burada 60 dakika fazla ön işlem uygulanmasına rağmen biyogaz üretim hızının farkı sadece 2,6 ml/g KM olarak belirlenmiştir. Ön işlem maliyeti açısından ideal reaktör 60 dakika ön işlem uygulandığı reaktör olarak seçilmelidir. 100 °C termal ön işlem sıcaklığında 60 dakika ön işlem sıcaklığında 255,5 ml/g KM biyogaz üretimi olurken 120 dakika ön işlem sonucunda 242,1 ml/g KM üretim gerçekleşmiştir. Benzer şekilde aynı sıcaklıkta 60 dakikada % 20,5 fazla suda çözünme olmuşken 120 dakikada % 20,1 oranında fazla suda çözünme olmuştur. Ön işlem süreleri arasında fark 1 saat olmasına karşın, % fazla suda çözünme miktarlarında anlamlı bir fark olmamıştır. Buradan anlaşılacağı üzere 100 °C ve 120 °C ön işlem sıcaklıklarında ideal ön işlem süresinin 60 dakika olduğu gözlemlenmiştir. 150 °C ve 180 °C ön işlem sıcaklıklarında ise maksimum verim ön işlem süresinin 60 dakika uygulandığı reaktörde gerçekleşmiştir. 150 °C ön işlem sıcaklığında ve 60 dakika ön işlem süresinde % fazla suda çözünme miktarı % 25,6 iken, 180 °C ön işlem sıcaklığında % fazla suda çözünme % 27,8 olarak belirlenmiştir. Fakat biyogaz üretimi % 25,6 fazla suda çözünen reaktörde 280,0 ml/g KM iken, % 27,8 fazla suda çözünen reaktörde 275,6 ml/g KM olarak meydana gelmiştir. % fazla suda çözünme miktarı çok olan reaktörde daha fazla biyogaz üretimi olması gerekirken, daha az üretim olmuştur. Bunun başlıca nedenleri arasında % 27,8 oranında daha fazla suda çözünen reaktörün metanojen üretebilme kapasitesinin, % 25,6 fazla suda çözünen reaktöre göre daha az olduğu yorumlanmıştır. Bunun olası nedenleri arasında metanojenlerin anaerobik fermantasyonda pH değerine karşı gösterdikleri direnç, anaerobik süreç ilerledikçe pH değişimlerine karşı gösterdikleri direnç, anaerobik fermantasyon sırasında ortamda serbest hale geçen  $\text{NH}_4^+$  dengesine karşı gösterdikleri direnç vardır.
- Alkali ön işlemler: Organik numunelere alkali ön işlem 8N KOH ve 8N NaOH çözeltileri ile uygulanmıştır. NaOH alkali ön işlemde en yüksek biyogaz oluşumu reaktördeki katı madde oranının % 20’si kadar kütlece alkali eklenmesi sonucu



meydana gelmiştir. Bu reaktör için toplam biyogaz üretim hızı 288,7 ml/g KM olarak meydana gelmiştir. NaOH alkali ön işlem sonuçlarında ön işlem sonucunda suda çözünme oranları ile biyogaz üretimi doğru orantılıdır. Fakat ön işlem miktarı ile biyogaz üretimi doğru orantılı şekilde ilerlememiştir. Örneğin reaktördeki katı kütlesinin % 20'si kadar alkali eklenen çözeltilerde % fazla suda çözünme % 32,4 olurken, % 30'u kadar alkali eklenen çözeltilerde % fazla suda çözünme % 24,8 olarak meydana gelmiştir. Bu değerlerden reaktöre eklenen alkali miktarı ile suda çözünme miktarları arasında bir doğru orantı olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun olası nedenleri arasında fazla alkali miktarının organik numunenin yapısında toksik etki oluşturmasıdır. KOH alkali ön işlem çalışmalarında ise en yüksek biyogaz oluşumu reaktördeki katı kütlesinin % 15'i kadar 8N KOH çözeltisinin eklenmesi ile meydana gelmiştir. KOH alkali ön işlem çalışmalarında % fazla suda çözünme miktarları ile biyogaz üretim miktarları doğru orantılı olarak bulunmuştur. Fakat reaktörlere eklenen KOH alkali miktarı ile % fazla suda çözünme miktarları doğru orantılı değildir. Örneğin % 15'i kadar kütlece 8N KOH eklenen reaktörde suda çözünme % 30,5 olduğu halde, % 20'si kadar kütlece 8N KOH eklenen reaktörde ise % fazla suda çözünme % 25,4 olmuştur. Yine NaOH alkali ön işlem çalışmalarında olduğu gibi bununda başlıca olası nedenleri arasında fazla alkali miktarının organik numuneler üzerinde toksik etki yaratmasıdır. Alkali ön işlem çalışmalarında ideal reaktörler KOH ön işlemi için % 15'i kadar kütlece KOH çözeltisinin eklendiği reaktör iken, NaOH ön işlemi için % 20'si kadar kütlece NaOH çözeltisinin eklendiği reaktör olarak belirlenmiştir. Alkali ön işlem çalışmalarında lignoselülozik bileşenlerden selüloz, hemiselüloz ve lignin bileşenleri arasından lignin ve hemiselüloz çözünmeleri hemiselüloz çözünmelerine göre daha etkili olmuştur. Buradan lignin oranı yüksek bileşenlere alkali ön işlem uygulanması daha etkili olacağı anlaşılmıştır.

- Asit ön işlemler: Asit ön işlem çalışmaları % 15'lik  $H_2SO_4$  ve % 15'lik  $HNO_3$  çözeltileri ile uygulanmıştır.  $H_2SO_4$  ön işlem çalışmalarında en yüksek suda çözünme, reaktördeki katı kütlesinin kütlece % 20'si kadar çözelti miktarının eklenmesi ile meydana gelmiştir.  $H_2SO_4$  ön işlemi sonucunda suda çözünme miktarı ile biyogaz üretim miktarı doğru orantılı olmuştur. Fakat reaktöre eklenen asit miktarı ile suda çözünme miktarları orantılı olmamıştır. Bunun olası nedenleri arasında fazla asitin birden organik numuneye eklenmesi sonucu toksik etki yaratması vardır. Ayrıca asit miktarının yoğun olması ile organik maddelerin birden tepkimeye girememeside

olabilir.  $\text{HNO}_3$  ön işlemlerinde ise yine maksimum biyogaz oluşumu reaktördeki katı kütlesinin kütlece % 20'si kadar çözelti miktarının eklenmesi ile meydana gelmiştir.  $\text{HNO}_3$  ön işlemi sonucunda suda çözünme miktarı ile biyogaz üretim miktarı doğru orantılı olmuştur. Fakat reaktöre eklenen asit miktarı ile suda çözünme miktarları orantılı olmamıştır. Bunun olası nedenleri arasında fazla asitin birden organik numuneye eklenmesi sonucu toksik etki yaratması vardır. Asit ön işlem çalışmalarında lignoselülozik bileşenlerden selüloz, hemiselüloz ve lignin bileşenleri arasından genel olarak hemiselüloz, lignin ve selüloza göre daha fazla çözülmüştür. Buradan hemiselüloz oranı yüksek bileşenlere asit ön işlem uygulanması daha etkili olacağı anlaşılmıştır.

- Termokimyasal ön işlemler: Termokimyasal ön işlemler suyun kaynama noktası sıcaklığında alkali ve asit çözeltilerinin reaktördeki katı madde oranının % 5, 10, 15, 20 ve 30'u kadar kütlece çözelti eklenmesi ile uygulanmıştır. En yüksek biyogaz üretimleri:

- ✓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -termal için % 10'u kadar reaktöre asit eklenmesi sonucu,
- ✓  $\text{HNO}_3$ -termal için % 10'u kadar reaktöre asit eklenmesi sonucu,
- ✓  $\text{NaOH}$ -termal için % 15'i kadar reaktöre alkali eklenmesi sonucu,
- ✓  $\text{KOH}$ -termal için % 10' u kadar reaktöre alkali eklenmesi sonucu meydana gelmiştir.

Genel olarak çözelti miktarı reaktördeki katı madde oranının % 30'una kadar çözelti eklenmesine karşın % 10'u kadar eklenen çözelti miktarları optimum biyogaz üretmiştir. Bunun olası nedenleri arasında yüksek sıcaklıkta alkali ve asit miktarının suda çözünmemesi vardır. Genel olarak biyogaz üretim miktarı % fazla suda çözünme miktarları ile doğru orantılı olmuştur. Fakat reaktöre eklenen asit-alkali çözelti miktarı ile suda çözünme miktarları doğru orantılı olmamıştır. Bunun olası nedenleri arasında oda sıcaklığından farklı olarak yüksek sıcaklıklarda asit ya da alkali miktarlarının reaktördeki katı maddenin kütlece % 10 ya da % 15'inden daha fazla toksik etki oluşturması vardır. Örneğin  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -termal için % 10' u kadar reaktöre asit eklenmesi sonucu % 55,8 daha fazla suda çözünme gerçekleşirken, % 15'i kadar reaktöre asit eklenmesi sonucu % 56,9 daha fazla suda çözünme gerçekleşmiştir. Fakat % 55,8 daha fazla suda çözünen reaktörde % 97 daha fazla biyogaz üretimi olurken, % 56,9 daha fazla suda çözünen reaktörde % 91,9 daha fazla üretim olmuştur. Bu iki reaktör arasında suda çözünmeler biyogaz üretim hızları arasında bir doğru orantı oluşturmamıştır. Bunun olası nedenleri arasında eklenen asit miktarının pH'ı düşürmesi ve anaerobik

fermantasyondan önce bu pH değerinin ayarlanması sırasında NaOH veya KOH çözeltilerinin eklenmesi sonucu, anaerobik mikroorganizmaların ortamda serbest halde bulunan  $K^+$  ve  $Na^+$  gibi bileşenlere yeterince direnç gösterememesi ya da farklı oranlarda direnç sağlamaları olmuştur. Termokimyasal ön işlemler sonucunda ideal reaktörler suyun kaynama noktası sıcaklığı sabit alındığında eklenen 8N alkali ya da % 15'lik asit çözeltilerinin düşük miktarlarda olması (reaktördeki katı madde oranının % 10'u ya da % 15'i gibi) gerekmektedir. Bu çalışma sonucunda ısıl işlem uygulanmadan sadece alkali ya da asit ön işlem uygulanacaksa daha yüksek çözelti miktarı gerektiği söylenebilir.

- Ultrases dalgası ön işlemleri: Ultrases dalga ön işlemleri düşük frekanslarda (yaklaşık 20 kHz) 5, 10, 20, 30, 50 ve 100 kJ şiddetlerinde ve 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika sürelerde ayrı ayrı uygulanmıştır. Ultrases dalga ön işlemi sonucunda suda çözünme miktarı ile biyogaz üretim miktarı doğru orantılı olmuştur. Fakat reaktöre uygulanan ultrases dalga şiddeti miktarı ile suda çözünme miktarları orantılı olmamıştır. Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda doğrudan suda çözümlerdeki artış, diğer ön işlemlerdeki artıştan daha az olarak meydana gelmiştir. Fakat anaerobik süreç sonunda ise suda çözümlerin miktarı diğer ön işlemlerden daha az olmasına karşın en az % 5,3, en fazla % 52,3 olarak meydana gelmiştir. Örneğin alkali ön işlem uygulanan reaktörler arasında R<sub>49</sub>'un ön işlem uygulandıktan sonra suda çözünmesi % 25,8 iken, biyogaz üretimindeki artış % 55,1 olarak meydana gelmiştir. Ultrases dalgası ön işlemi uygulanan reaktörler arasında ise R<sub>97</sub>'de % 14,5 suda çözünme meydana gelirken, biyogaz üretimindeki artış % 52,5 olarak gerçekleşmiştir. Ultrases dalgası ön işlemi sonucunda maksimum suda çözünme % 52,5 olarak 30 kJ ultrases dalga şiddetine 20 dakika maruz bırakılan reaktörde meydana gelmiştir.

Böylece ultrases dalga ön işlemi fiziksel bir ön işlem olduğundan kimyasal olarak suda çözümlere katkı sağlayamamıştır. Fakat ultrases dalgası ön işlemi selüloz ve hemiselülozun anaerobik süreçlerde suda çözümleri için uygun ortam sağladığı, hidrolitik bakteri enzimleri için uygun boşlukların oluşturduğu, lignoselülozik yapıda bulunan selüloz ve hemiselülozun anaerobik süreçte zayıflatan enzimler için uygun ortam yarattığı söylenebilir. Ultrases dalgası uygulanan organik numunelerin doğrudan selüloz ve hemiselüloz miktarında değişime uğramaması fakat anaerobik fermentasyondan sonra azalma gözlemlenmesi nedeniyle ultrases dalgalarının lignoselülozik rijit yapıdaki selüloz ve hemiselüloz bağlarında bir gevşeme yarattığı ve anaerobik mikroorganizmaların hidroliz işlemini kolaylaştırdığı söylenebilir.

Bu çalışmada yapılan bütün ön işlemsiz hammaddenin anaerobik fermantasyonu sonucu oluşan H<sub>2</sub>S değeri 952 ppm iken termal, alkali ve termokimyasal ön işlemler sonucu oluşan biyogazın içeriğindeki H<sub>2</sub>S değerinin tümü bu değerden yüksek çıkmıştır. Bunun olası nedenleri arasında ön işlem uygulanan reaktörlerin anaerobik fermantasyonu kısa sürmesi ve bunun sonucu olarak H<sub>2</sub>S miktarının sulu karışım içerisinde daha az çözünmesi olduğu söylenebilir. Ultrases dalgası ön işleminde organik maddenin anaerobik fermantasyon sonrasında oluşan gaz karışımı analiz edildiğinde H<sub>2</sub>S değerlerinin ön işlemsiz organik maddenin anaerobik fermantasyon sonrası oluşturduğu değerlere çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bunun muhtemel nedeninin ultrases dalga ön işleminin anaerobik fermantasyon süreci diğer ön işlemlerden en az 10 gün fazla olması ve bu süreçte reaktörde kalan H<sub>2</sub>S değerinin sulu karışım içerisinde çözünmüş olduğu söylenebilir.

Çalışma sonucunda ön işlemsiz ve ön işlem uygulanan reaktörlerden maksimum verim alınanlar seçilip Bertalanffy ve Logistic model denklemlerine uyumluluğu incelenmiştir. Belirleme katsayı (R<sup>2</sup>) değerlerinden anlaşılacağı üzere bütün değerlerin 0,9'dan yüksek olması nedeniyle bu modellere uyduğu gözlemlenmiştir. R<sup>2</sup> değerleri gözönünde bulundurulursa gerçek değerlere Bertalanffy model Logistic modelden daha fazla uyumlu olduğu söylenebilir. Yapılan ön işlemler sonucunda Bertalanffy ve Logistic modelin gecikme süreleri azalmıştır. Gecikme süreleri azaldıkça modelin uyumluluğu artmıştır. Biyogaz üretim hızının yüksek olduğu değerlerde (300 ml/g KM) model uyumsuzlaşmaya başlamıştır. Bertalanffy ve Logistic modelin spesifik biyogaz üretim hızı ise gecikme süresi ve R<sup>2</sup> değerlerinden bağımsız olarak gerçek biyogaz üretim hızına göre değişiklik gösterdiği söylenebilir.

Bu çalışmada lignoselülozik bileşen içeren organik atıklara termal, alkali, asit, termokimyasal ve ultrases dalgası ön işleminde uygulanmıştır. Biyogaz üretim çalışmalarında organik maddelerin yapısında bulunan karbonhidratlar doğrudan suda çözünürken, yağlar ve proteinler de zamanla suda çözünebilmektedirler. Fakat selüloz, hemiselüloz ve lignin içeren yapıların suda çözünmesi çok az olmakta hatta bazılarının hiç olmamaktadır. Bu nedenle lignoselülozik maddelerin suda çözünmeleri anaerobik fermantasyonda değerlendirilmeleri açısından önem kazanmaktadır. Fakat ön işlem teknolojileri maliyetli olmaları açısından dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada çeşitli aralıklarda (düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa, düşük çözelti miktarından yüksek çözelti miktarına

vb.) ön işlem şartları uygulanmıştır. Uygulanan ön işlemler sonucunda üretilen biyogaz miktarına göre ön işlem koşulları yorumlanmış ve optimize edilmiştir.

Çalışmada uygulanan ön işlemler sonrasında organik numunelerin yüzey morfolojisindeki ne gibi değişikliklerin olduğunu görmek için SEM görüntüleri incelenmiştir. Termal ön işlemler sonucunda yüzey yapısında 100 °C sıcaklıkta yorumlanabilir değişikliklerin az olduğu fakat sıcaklığın 180 °C şartlarına doğru çıktıkça kırılma ve çatlakların arttığı ve yüzey morfolojisinin değişime uğradığı görülmüştür. Alkali ön işlemlerde ise yüzey morfolojisinin hem NaOH ön işleminde hem de KOH ön işleminde değişime uğradığı gözlemlenmiştir. Bu iki baz çözeltisi gözenekli yapı ve aşınma oluşturması açısından benzer etkiler oluşturmuştur. Asit ön işlemlerin SEM görüntüleri sonucunda ise yine alkali ön işlemlere benzer şekilde yüzey yapılarındaki kırıkların ve gözenekli yapıların olduğu görülmüştür. Termokimyasal ön işlemin SEM görüntüleri sonuçlarında ise termal, alkali ve asit ön işlemlere göre daha büyük gözenek çaplarının olduğu ve yüzey morfolojisinin en fazla deforme olduğu gözlemlenmiştir. Ultrases dalga ön işlemleri sonucunda incelenen SEM görüntülerinde ise, diğer ön işlemlerden daha az yüzeyin deforme olduğu gözlemlenmiştir. Bunun olası nedenleri ultrases dalgasının fiziksel bir ön işlem olduğu ve herhangi bir molekül yapısını değiştirmediği olarak açıklanabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Converti, A., Oliveira, R.P.S., Torres, A., Zilli, M.** (2009). Biogas Production and Valorization by Means of a Two-Step Biological Process, *Bioresource Technology*, 100, 5771 - 5776.
- [2] **Bo Holm-Nielsen, J., Al Seadi, T.** (1998). Biogas in Europe: a General Overview, South Jutland University Centre, Bioenergy Department.
- [3] **Tafdrup, S., Hjort-Gregersen, K.** (2000). Centralised Biogas Plants, Centre for Biomass Technology ([www.videncenter.dk](http://www.videncenter.dk)). Alındığı tarih: 21.02.2015.
- [4] **Ojolo, S.J., Oke, S.A., Animasahun, B.K., Adesuyi, B.K.** (2007). Utilization of poultry, cow and kitchen wastes for biogas production: a comparative analysis, Department of mechanical engineering university of Iagos, 4, 223 - 228.
- [5] **İnal, A., Sözüdoğru, S., Erden, D.** (1996). Tavuk gübresinin içeriği ve gübre değeri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 2 (3), 45 - 50.
- [6] **Ming X., Zhao W., Ruan, Q.** (2013). Biogas performance from co-digestion of Taihu algae and kitchen wastes. *Energy Conversion and Management*, 75, 21 - 24.
- [7] **Taherzadeh, M.J. Karimi, K.** (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9 (9), 1621 - 1651.
- [8] **Ardıç, İ.** (2003). Termal, kimyasal ve termokimyasal ön işlemlerin tavuk gübresinden biyogaz üretim verimine etkilerinin araştırılması, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi), 132s. Mersin.
- [9] **Koçar G., Eryaşar A., Ersöz Ö., Arıcı Ş., Durmuş A.** (2010). Biyogaz teknolojileri, *Ege Üniversitesi Basımevi*, 281s, İzmir.
- [10] **Eryaşar, A., Koçar, G.** (2009). Biyogazın mevcut ısınma sistemlerinde kullanılabilme olanakları. *Mühendis ve makina*, 50 (590), 10 - 16.
- [11] **Alibaş, K.** (1996). Sığır gübresi, tavuk gübresi ve arpa sapından sakrofilik, mezofilik ve termofilik fermantasyonla biyogaz üretimlerinin ve fermantör enerji bilançolarının belirlenmesi. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Araştırma ve İncelemeler, No:13, Bursa.
- [12] **Kalelioğlu, K.** (2017). Biyogaz tesisleri, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Biyogaz Sistem Mühendisliği. [www.soleaenerji.com](http://www.soleaenerji.com). Alındığı tarih: 26.11.2019.
- [13] **Url-1** <[www.kimyamuhendisligi.com](http://www.kimyamuhendisligi.com)>, alındığı tarih: 26.10.2017.
- [14] **Çelikkaya, H.** (2018). 'Biyogaz'. Fırat Kalkınma Ajansı. [http://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik\\_Dosya\\_Ekleri/FKA\\_ARASTIRMA\\_RAPORLARI/%C3%96ZEL%20ARA%C5%9ETIRMALAR%20SER%C4%B0S%C4%B0%2010%20-%20B%C4%B0YOGAZ.pdf](http://fka.gov.tr/sharepoint/userfiles/Icerik_Dosya_Ekleri/FKA_ARASTIRMA_RAPORLARI/%C3%96ZEL%20ARA%C5%9ETIRMALAR%20SER%C4%B0S%C4%B0%2010%20-%20B%C4%B0YOGAZ.pdf). Alındığı tarih: 15.12. 2016.
- [15] **Kowsari, C.** (2018). Pictures for Lignocellulose Structured (<http://www.biofuel.webgarden.com/sections/blog/pictures-for-lignocellulose>). Alındığı tarih: 29.05.2017.
- [16] **Fry, L. J.** (1973). Methane Digesters for Fuel Gas and Fertilizer -With Complete Instructions For Two Working Models, The NewAlchemy Institute, Massachusetts.
- [17] **Kishore, V. V. N., Raman, P., Rao, V.V.R.** (1987). Fixed Dome Biogas Plants-A Design, Construction and Operation Manual, Tata Energy Research Institute, New Delhi.
- [18] **Arnott, M.** (1985). The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Peace Corps, Information Collection and Exchange, Reprint R-48.

- [19] **Pound, B., Done, F., Preston, T.R.** (1981). Biogas production from mixtures of cattle slurry and pressed sugar cane stalk, with and without urea, *Tropical Animal Health and Production*, 6, 11 - 21.
- [20] **Stuckey, D.C.** (1981). Gelişmekte olan ülkelerde ısı ve katkı maddelerinin anaerobik sindirime etkisi, Uluslararası Biyogaz Semineri, 23-26.11.1981, Ankara, 16-40.
- [21] **Kırımhan, S.** (1981). Biyogazın Oluşumu - Özellikleri ve Türkiye'de Yararlanma İmkanları, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 158-172.
- [22] **Vijayalekshmy, M.V.** (1985). Biogas technology an information package, tata energy research institute, Bombay.
- [23] **Göğüş, A.Y.** (1986). İşte Biyogaz, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 9 (4), 42 - 44.
- [24] **Werner, U., Stöhr, U., Hees, N.** (1989). Biogas Plants in Animal Husbandry, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- [25] **Seadi, T.A.** (2001). Good practice quality management of add residues from biogas production, Task 24-Energy from biological conversion of organic waste, IEA Bioenergy, <http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-ask37/Dokumente/managementpaw3.PDF>. Alındığı tarih: 10.11.2015.
- [26] **Anonim** (1999). Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- [27] **Demuyne, M., Nyns, J., Palz, W.** (1984). Biogas Plants in Europe, Energy from Biomass Series, 6. D. Reidel Publishing Company, Boston, USA.
- [28] **Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V.V.N.** (2000). State-of-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 135 - 156.
- [29] **Pekin, B.** (1983). Biyokimya Mühendisliği (Biyoteknoloji), *Ege Üniversitesi Kimya Fakültesi Yayınları*. 368 - 385s. İzmir.
- [30] **Kashyap, D.R., Dadhich, K.S., Sharma, S.K.** (2003). Biomethanation under psychrophilic conditions: A Review, *Bioresource Technology*, 87, 147 - 153.
- [31] **Sasse, L.** (1988). Biogas Plants, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- [32] **Ruggeri, B.** (1986). Kinetic and Thermal Aspects of Biogas Production, *Agricultural Wastes*, 16, 183 - 200.
- [33] **Wenxiu, T., Mengjie, W.** (1989). Experiment and research on mesophilic anaerobic digester with dairy cattle manure in northern china, *Biomass*, 20, 41 - 52.
- [34] **Axaopoulos, P., Panagakis, P., Tsavdaris, A., Georgakakis, D.** (2001). Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester, *Solar Energy*, 70 (2), 155 - 164.
- [35] **Marchaim, U.** (1992). Biogas Processes for Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-103126-6.
- [36] **Sambo, A.S., Garba, B., Danshehu, B.G.** (1995). Effect of Some Operating Parameters on Biogas Production Rate, *Renewable Energy*, 6 (3), 343-344.
- [37] **El - Mashad, H. M., Van Loon, W.K.P., Zeeman, G.** (2003). A Model of Solar Energy Utilisation in the Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Biosystems Engineering*, 84 (2), 231 - 238.

- [38] **Alkhamis, T. M., El-Khazali, R., Kablan, M. M., Alhusein, M. A.** (2000). Heating of a Biogas Reactor Using a Solar Energy System with Temperature Control Unit, *Solar Energy*, 69 (3), 239 - 247.
- [39] **Gustavsson, M.** (2000). Biogas Technology-Solution in Search of Its Problem-A Study of Small-Scale Rural Technology Introduction and Integration. Göteborg University, Göteborg.
- [40] **Stafford, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R.** (1981). Methane Production from Waste Organic Matter, CRC Press, Inc., ISBN 0-8493-5223-1, Boca Raton, Florida.
- [41] **El-Mashad, H.M., Van Loon, W.K.P., Zeeman, G.** (2003). A Model of Solar Energy Utilisation in the Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Biosystems Engineering*, 84 (2), 231 - 238.
- [42] **Öztürk, M.** (2005). Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi. <http://www.orman.gov.tr/>, Alındığı tarih: 10.07.2015.
- [43] **Dennis, A., Burke, P.E.** (2001). Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, Options for Recovering Beneficial Products From Dairy Manure, *Environmental Energy Company*, [www.makingenergy.com](http://www.makingenergy.com), Alındığı tarih: 11.12.2014.
- [44] **Jenangi, L.** (1981). Producing Methane Gas From Effluent, *Adelaide University Diploma in Agricultural Production*, [www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf](http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf). Alındığı tarih: 11.12.2015.
- [45] **Monnet, F.** (2003). An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes, [http://www.remade.org.uk/documents/reports/An%20Introduction%20to%20Anaerobic%20Digestion%20\\_27153953177.pdf](http://www.remade.org.uk/documents/reports/An%20Introduction%20to%20Anaerobic%20Digestion%20_27153953177.pdf). Alındığı tarih: 11.12.2016.
- [46] **Al-Azzam, S.M.** (2003). Biogas a Source of Energy, <http://www.jes.org.jo/projects/BioGas/pdfs/s/english.pdf>. Alındığı tarih: 11.12.2010.
- [47] **Boyd, R.** (2000). Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, University of East Anglia, [www.green-trust.org/PigSlurryADProject.pdf](http://www.green-trust.org/PigSlurryADProject.pdf).
- [48] **Sarapatka, B.** (1993). A Study of Biogas Production During Anaerobic Fermentation of Farmyard Manure, *Biomass and Bioenergy*, 5 (5), 387 - 393.
- [49] **Köse, F.** (1998). Güneş Isıtımlı Biyogaz Üretimi, *Enerji Workshop-1*, Alternatif Enerji Kaynakları, Selçuk Üniversitesi-Ege Üniversitesi, Konya, Ekim 98, 94 - 100.
- [50] **Yenilmez, F., Çelik, L., Kutlu, HR.** (2012). Tavuk gübresinin kullanım alanları. *Ulusal Kümes Hayvanları Kongresi Bildiriler Kitabı*, 3 - 5 Ekim; 457 - 465. İzmir.
- [51] **Çağlar, A., Uçar, T.** (1981). Türkiye'de Biyogaz Potansiyeli ve Üretim Kinetiği, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, 290 - 303, Ankara.
- [52] **Karim, K., Klasson, K. T., Hoffmann, R., Drescher, S. R., De Paoli, D.W., Al-Dahhan, M.H.** (2005). Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mixing, *Bioresource Technology*, 96, 1607 - 1612.
- [53] **Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., Al-Dahhan, M.H.** (2005). Anaerobic digestion of animal waste: waste strength versus impact of mixing, *Bioresource Technology*, 96, 1771 - 1781.
- [54] **Durán, I., Álvarez-Gutiérrez, N., Rubiera, F., & Pevida, C.** (2018). Biogas purification by means of adsorption on pine sawdust - based activated carbon: Impact of water vapor. *Chemical Engineering Journal*, 353, 197-207.
- [55] **Chynoweth, D.P. and Isaacson, R.** (1987). Anaerobic digestion of biomass, springer; 1 edition, 282s.



- [56] **Nijaguna, B.T.** (2002). Biogas technology, New Age International Publishers, New Delhi, 289s.
- [57] **Alvarez, R., Villca, S., Lide'n, G.** (2005). Biogas production from llama and cow manure at high altitude generation and for farm machine fuel, *Biomass and Bioenergy*, 30, 66–75.
- [58] **Klein, J.** (2002). Anaerobic wastewater treatment – the anaerobic digestion of lipids, tampere university of technology, Department of Environmental Engineering. <http://studweb.studserv.uni-stuttgart.de>, Alındığı tarih: 01.02.2015.
- [59] **Wereko-Brobby, C.Y., Hagen, E.B.** (1996). Biomass conversion and technology, Chichester : *John Wiley & Sons*, 76-82.
- [60] **Verma, S.** (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes, Columbia University, <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>. Alındığı tarih: 08.02.2016.
- [61] **Solera, R., Romero, L.I., Sales, D.** (2002). The evolution of biomass in a two-phase anaerobic treatment process during start-up, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 16 (1), 25–29.
- [62] **Pullammanappallil, P. C., Chynoweth, D. P., Lyberatos, G., Svoronos, S. A.** (2001). Stable performance of anaerobic digestion in the presence of a high concentration of propionic acid, *Bioresource Technology*, 78 (2), 165-169.
- [63] **T.H.Kim, J. S. Kim, C. Sunwoo, and Y. Y. Lee.** (2003). Pretreatment of cornstover by aqueous ammonia. *Bioresource Technology*, 90 (1), 39–47.
- [64] **Taherzadeh, M.J., Karimi, K.,** (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review, *International Journal of Molecular Sciences*, 9 (9), 1621-1651.
- [65] **Şenol, H., Elibol, E.A., Açikel, Ü., Şenol, M.** (2017). 2016'da Türkiye'de kanatlı hayvanlardan üretilebilecek biyogaz ve elektrik enerji potansiyeli, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (1), 1-11, 2017.
- [66] **Eyidoğan, M.** (2008). Biyogazın saflaştırılması ve motorlu taşıt yakıtı olarak kullanımı. *Mühendis ve makina*, 49 (584), 18-24.
- [67] **Lie, J.A.** (2005). Synthesis, performance and regeneration of carbon membranes for biogas upgrading, PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- [68] **Kapdi, S. S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K., Prasad, R.** (2005). Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context, *Renewable Energy*, 30, 1195 - 1202.
- [69] **Arnott, M.** (1985). The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Peace Corps, Information Collection and Exchange, Reprint R-48.
- [70] **Buğutekin A.** (2007), Atıklardan Biyogaz Üretiminin İncelenmesi. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. (Doktora Tezi), 152s, İstanbul.
- [71] **Stern, S.A., Krishnakumar, B., Charati, S.G., Amato, W.S., Friedman, A.A., Fuess, D.J.** (1998). Performance of a bench-scale membrane pilot plant for the upgrading of biogas in a wastewater treatment plant, *Journal of Membrane Science*, 151 (1), 63-74.
- [72] **Kayhanian, M. and Hills, D.J.** (1988). Membrane purification of anaerobic digester gas. *Biological Wastes*, 23 (1), 1 - 15.
- [73] **Li, K. and Teo, W.K.** (1993). Use of an internally staged permeator in the enrichment of methane from biogas, *Journal of Membrane Science*, 78 (2), 181 - 190.

- [74] **Rautenbach, R. and Welsch, K.** (1994). Treatment of landfill gas by gas permeation-plot Plant results and comparison to alternatives. *Journal of Membrane Science*, 87, 107 - 118.
- [75] **Url-2** <<http://www.tigkaynak.com/threads/h2s-hidrojen-sulfur-zehirli-gaz.3/>>, alındığı tarih: 06.04.2018.
- [76] **Boyd, R.** (2000). Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, *University of East Anglia*, <http://www.green-trust.org/%20PigSlurryADProject.pdf>.
- [77] **Muche, H. and Zimmermann, H.** (1985). The purification of biogas, deutsches zentrum für entwicklungs technologien-GATE, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit(GTZ) GmbH, Eschborn.
- [78] **Munoz, F. and López, R.** (2000). Anaerobic Digestion System Installation of Cattle Manure in Two Farms in Puebla, Mexico, <http://wire0.ises.org/wire/doclibs/File/221.pdf>.
- [79] **Walsh, J.L., Ross, C.C., Smith, M.S., Harper, S.R.** (1989). Utilization of Biogas, *Biomass*, 20, 277 - 290.
- [80] **Samsunlu, A.**(2005). Çevre Mühendisliği Kimyası, Birsen yayınevi. ISBN: 975-511 - 427 - 0, İstanbul.
- [81] **Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee D.H. Zheng, C.** (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86, 1781 - 1788.
- [82] **Hendriks, A. T. W. M., Zeeman, G.** (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 100 (1), 10 - 18.
- [83] **Bochmann, G., Montgomery, L.F.R., Murphy, J., Baxter, D.** (2013). Storage and pretreatment of substrates for biogas production A2 Wellinger, Arthur. In: *The Biogas Handbook*, Woodhead Publishing, 42, 85 - 103.
- [84] **Lay, J., Li, Y.Y. and Noike, T.** (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solid sludge digestio, *Water Research*, 31 (6), 1518 - 1524.
- [85] **Bochmann, G., Montgomery, L.F.R., Murphy, J., Baxter, D.** (2013). Storage and pretreatment of substrates for biogas production A2 Wellinger, Arthur. In: *The Biogas Handbook*, Woodhead Publishing, 42, 85 - 103.
- [86] **Onyeche, T.I., Schäfer, O., Bormann, H., Schröder, C., Sievers, M.** (2002). Ultrasonic cell disruption of stabilised sludge with subsequent anaerobic digestion. *Ultrasonics*, 40 (8), 31 - 35.
- [87] **Taherzadeh, M.J., Karimi, K.** (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review, *International Journal of Molecular Sciences*, 9 (9), 1621 - 1651.
- [88] **Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G.** (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass, *Bioresource Technology*. 100 (1), 10 - 18.
- [89] **Johnson, D.K., Elander, R.T.,** (2009). Pretreatments for enhanced digestibility of feedstocks. *Biomass Recalcitrance*, Blackwell Publishing Ltd. 436–453.
- [90] **Tsapekos, P., Panagiotis G., Kougiyas A. Frison R., Raga I.** (2016). Improving methane production from digested manure biofibers by mechanical and thermal alkaline pretreatment, *Bioresource Technology*, 216, 545 - 552.
- [91] **Hsu, T.A.** (1996). Pretreatment of biomass. In: Wyman, C.E. (Ed.), *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization*, Taylor & Francis, London, 179 - 212.
- [92] **Sun, Y., Cheng, J.** (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology*, 83 (1), 1 - 11.

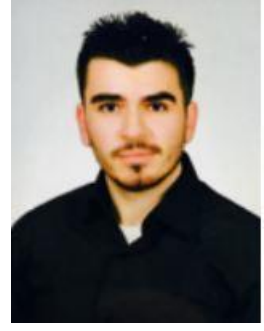
- [93] **Li, L., Kiran, E.** (1988). Interaction of supercritical fluids with lignocellulosic materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 27 (7), 1301 - 1312.
- [94] **Wikandari, R., Nguyen, H., Millati, R., Niklasson, C., Taherzadeh, M.J.** (2015). Improvement of biogas production from orange peel waste by leaching of limonene. *Biomed Research International*, 2015, 1–6.
- [95] **Fellahi, S., Zaghoul, T.I., Feuk-Lagerstedt, E., Taherzadeh, M.J.** (2014). A bacillus strainable to hydrolyze alpha- and beta-keratin. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 4 (7), 7-15.
- [96] **Forgács, G.** (2012). Biogas production from citrus wastes and chicken feather: pretreatment and co-digestion. [http://hb.diva-portal.org/smash/get/diva2:877013 /FULLTEXT01](http://hb.diva-portal.org/smash/get/diva2:877013/FULLTEXT01), Alındığı tarih: 26.11.2018.
- [97] **Pahla, G., Mamvura, T.A., Ntuli, F., Muzenda, E.** (2017). Energy Densification Of Animal Waste Lignocellulose Biomass and Raw Biomass, *South African Journal of Chemical Engineering*, 24 (2017), 168-175.
- [98] **Elibol, E.A.** (2017). Gözenekli Düz Bir Yüzeve Çarpan Jetin Sayısal Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek lisans tezi), 108s, Ankara.
- [99] **Aktaş, F.** (2015). Katalitik Konvertör Öncesinde Isıtmanın Konvertör Verime Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi), 120s, Ankara.
- [100] **Koç, B., Kaymak F., Ertekin, K.** (2009). Yanıt Yüzey Yöntemi ve Gıda İşleme Uygulamaları. Ege Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
- [101] **Batstone, D.J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S.V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W.T.M., Siegrist, H. Vavilin, V.A.** (2002). (IWA Task Group for Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion Processes), *Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1)*, *IWA Scientific and Technical Report No.13*, IWA Publishing, London.
- [102] **Ntaikou, I., Gavala, H.N., Lyberatos, G.** (2009). Modeling of fermentative hydrogen production from the bacterium *Ruminococcus albus*: Definition of metabolism and kinetics during growth on glucose, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 3697 - 3709.
- [103] **Gadhamshetty, V., Arudchelvam, Y., Nirmalakhandan, N., Johnson, D.C.** (2010). Modeling dark fermentation for biohydrogen production: ADM1-based model vs. Gompertz model, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 479 - 490.
- [104] **Syaichurrozi, I., and Sumardiono, S.** (2013). Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 149, 390 - 397.
- [105] **Bushwell, A.M., and Mueller, H.F.** (1952). Mechanisms of methane fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44, 550.
- [106] **Dhamodharan, K., Kumar, V., Kalamdhad, A.S.** (2015). Effect of different livestock dungs as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics, *Bioresource Technology*, 180, 237 - 241.
- [107] **Forster - Carneiro, T., Perez, M., Romero, L.I.** (2006). Composting potential of different inoculum sources in the modified SEBAC system treatment of municipal solid wastes, *Bioresource Technology*, 98, 3354 - 3366.
- [108] **Lopes, S.M., Leite, V.D., Prasad, S.** (2004). Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste, *Bioresource Technology*, 94, 261 - 266.

- [109] **Narra, M., Balasubramanian, V., Anil Kurchania, A., Pathak, B.S., Murari Shyam, M.** (2016). Enhanced biogas production from rice straw by selective micronutrients under solid state anaerobic digestion, *Bioresource Technology*, 220, 666 - 671.
- [110] **Maamri, S., and Amiani, M.** (2014). Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: Effect of total solid contents and kinetics study, *Energy Procedia*, 50, 352 - 359.
- [111] **Günel, G., İnce, O., Özbayram, E.G., Akyol, Ç., İnce, B.** (2015). Rumen sıvısının aşı olarak kullanıldığı büyükbaş hayvan dışkısı ile işletilen anaerobik çürütücülerde asidifikasyon veriminin incelenmesi, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1(1), 27 - 38.
- [112] **Ojolo, S.J., Oke, SA., Animasahun, B.K., Adesuyi, B.K.** (2007). Utilization of poultry, cow and kitchen wastes for biogas production: a comparative analysis, Department of mechanical engineering university of lagos, 4, 223 - 228.
- [113] **Ziauddin, Z., Rajesh, R.** (2015). Production and analysis of biogas from kitchen waste, *International research journal of engineering and technology*, 2(4), 622 - 632.
- [114] **Syaichurrozi, I.** (2013). Biogas production from co-digestion *Salvinia molesta* and rice straw and kinetics, *Renewable Energy*, 115,76 - 86.
- [115] **Malakahmad, A., Ahmad Basri, N., Zain, S. Md.** (2015). The application of an anaerobic baffled reactor to produce biogas from kitchen waste, *Waste to Energy*, 84, 19-28.
- [116] **Temesgen Garoma, T., Pappaterra, D.** (2017). An investigation of ultrasound effect on digestate solubilization and methane yield, *Waste Management*, 71, 728 - 733.
- [117] **Karray, R., Hamza, M., Sayadi, S.** (2015). Evaluation of ultrasonic, acid, thermo-alkaline and enzymatic pre-treatments on anaerobic digestion of *Ulvarigida* for biogas production, *Bioresource Technology*, 187, 205 - 213.
- [118] **Zou., S. Wang, X., Chen Y., Wan., H., Feng , Y.H.** (2016). Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment, *Energy Conversion and Management*, 112, 226 - 235.
- [119] **Rasopoor, M., Ajabshirchi, Y., Adl, M., Abdi, R., Gharibi, A.** (2016). The effect of ultrasonic pretreatment on biogas generation yield from organic fraction of municipal solid waste under medium solids concentration circumstance, *Energy Conversion and Management*, 119, 444 - 452.
- [120] **Wang, S., Ruan, Y., Zhou W., Li, Z., Wu J., Liu D.** (2017). Net energy analysis of small-scale biogas self-supply anaerobic digestion system operated at psychrophilic to thermophilic conditions, *Journal of Cleaner Production*, 174, 226 - 236.
- [121] **Castrillón, L., Fernandes, N., Marañón, E.** (2011). Optimization of biogas production from cattle manure by pre-treatment with ultrasound and co-digestion with crude glycerin, *Bioresource Technology*, 102 (17), 7845 - 7849.
- [122] **Neumann, P., Gonzales, Z., Gladys Vidal, G.** (2017). Sequential Ultrasound and Low-Temperature Thermal Pretreatment: Process Optimization And Influence on Sewage Sludge Solubilization, Enzyme Activity and Anaerobic Digestion, *Bioresource Technology*, 234, 178 - 187.
- [123] **Braeutigam, P., Franke, M., Ondruschka, B.** (2014). Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production, *Biomass and Bioenergy*, 63, 109-113.

- [124] **Liu, C., Huan, Li., Zhang, Y., Liu C.** (2016). Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste, *Bioresource Technology*, 219, 252 - 260.
- [125] **Ana Cerar, L., Faneli, L., Borut L., Lazar Z., Romana M.** (2017). Thermal pretreatment and bioaugmentation improve methane yield of microalgal mix produced in thermophilic anaerobic digestate, *Anaerobe*, 46, 162 - 169.
- [126] **APHA** (2005). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 21st Edition, , AWWA, WEF 2540 G.
- [127] **Samsunlu, A.** (1999). Çevre Mühendisliği Kimyası, İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Sam-Çevre Teknolojileri Merkezi yayınları, İstanbul.
- [128] **Van Soest, P. J., Robertson, J. B., Lewis. B. A.** (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition, *Journal of Dairy Science*, 74, 3583-3597.
- [129] **Dianni, M.** (2016). İnsan ve Hayvan Sağlığı Açısından Risk Oluşturan Enterokokal Biyofilm Yapısının Doğası, *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 73, 71-80.
- [130] **Url-2** < [< http://www.bilgeniz.com/standart-sapma-nedir-nasil-hesaplanir-formulu-ve-ornekler/>](http://www.bilgeniz.com/standart-sapma-nedir-nasil-hesaplanir-formulu-ve-ornekler/) , alındığı tarih: 26.09.2018.
- [131] **Hepbash, A., Balta, M.T.** (2007). A Study on Modeling and Performance Assessment of A Heat Pump System for Utilizing Low Temperature Geothermal Resources in Buildings, *Building and Environment*, 42, 3747 - 3756.
- [132] **Dogru, M., Midilli, A., Howarth, C.R.** (2002). Gasification of Sewage Sludge Using A Throated Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis, *Fuel Processing Technology*, 75, 55 - 82.
- [133] **Moonkyung, K., Byung-Chul, K., Kyoungphile, N., Yongju, C.** (2018). Effect of pretreatment solutions and conditions on decomposition and anaerobic digestion of lignocellulosic biomass in rice straw, *Biochemical Engineering Journal*, 140, 108 - 114.
- [134] **Ferreira, L. C., Donoso-Bravo, A., Nilsen, P.J., Fdz-Polanco, F., Pérez-Elvira, S.I.** (2013). Influence of thermal pretreatment on the biochemical methane potential of wheatstraw, *Bioresource Technology*, 143, 251 - 257.
- [135] **Ennouri, H., Miladi, B., Diaz, S.Z., Güelfo, L.A.F., Solera, R., Hamdi, M., Bouallagui, H.** (2016). Effect of thermal pretreatment on the biogas production and microbial communities balance during anaerobic digestion of urban and industrial waste activated sludge, *Bioresource Technology*, 214, 184–191.
- [136] **Bolado-Rodríguez, S., Toquero, C., Martín-Juárez, J., Travaini, R., García Encina, P.A.** (2016). Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 201, 182–190.
- [137] **Asad Ayub, R., Zeshana., Chettiyappan, V.** (2018). Effect of thermal pretreatment on chemical composition, physical structure and biogas production kinetics of wheat straw, *Journal of Environmental Management*, 221, 45 - 52.
- [138] **Patowarya, D., and Baruah, D.C.** (2018). Effect of combined chemical and thermal pretreatments on biogas production from lignocellulosic biomasses, *Industrial Crops & Products*, 124 (2018), 735 - 746.

- [139] **Shuzhen, Z., and Di, K.** (2018). Relation ship between anaerobic digestion characteristics and biogasproduction under composting pretreatment, *Renewable Energy*, 125, 485- 494.
- [140] **Sarto, S., Raudati, H., Iqbal S.** (2018). Effect of chemical pretreatment using sulfuric acid on biogas production from water hyacinth and kinetics, *Renewable Energy*, 132, 335 - 350.
- [141] **Gabriele, M., Stefano, P., Gerardo, R., Piet, N.L.L., Giovanni E.** (2018), Trace elements dosing and alkaline pretreatment in the anaerobic digestion of rice straw, *Bioresource Technology*, 247, 897 - 903.
- [142] **Peyman, S., Keikhosro, K., Hamid, Z., Azam, J.** (2013). Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment, *Fuel*, 106, 484 - 489.
- [143] **Mohsen, T., Hamid, Z.** (2014). Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment, *Fuel*, 115, 714 - 719.
- [144] **Dianlong, W., Ping, A., Liang, Y., Zhongxin, T., Yanlin, Z.** (2015). Comparing the hydrolysis and biogas production performance of alkali and acid pretreatments of rice straw using two-stage anaerobic fermentation, *Biosystems Engineering*, 132, 47 - 55.
- [145] **Ayman Öz, N., Çağla Uzun., A.** (2015). Ultrasound pretreatment for enhanced biogas production from olive mill wastewater, *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 565 - 572.
- [146] **Ormaechea, P., Castrillon, L., Suarez-Pena, B., Megido, L., Fernandez - Nava Y., Negral L., Maranon, E., Rodríguez-Iglesias J.** (2018). Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and/or co-digested at pilot-plant scale. Characterization by SEM, *Renewable Energy*, 126, 897 - 904.
- [147] **Ayman Öz, N., Can Yarimtepe, C.** (2014). Ultrasound assisted biogas production from landfill leachate, *Waste Management*, 34, 1165 - 1170.
- [148] **Deepanraj, B., Sivasubramanian, V., Jayaraj, S.** (2017). Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (42), 26522 - 26528.
- [149] **Salsabil, M., Prorot, A., Casellas, M., Dagot, C.** (2009). Pre-treatment of activatedsludge: effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility. *Chemical Engineering Journal*, 148, 327 - 335.
- [150] **Naran, E., Ali Toor, U., Kim, D.** (2016). Effect of pretreatment and anaerobic codigestionof food waste and waste activated sludge on stabilization andmethane production. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 17 - 21.
- [151] **Sahinkaya, S., Sevimli, M.** (2013). Sono-thermal pre-treatment of waste activated sludge before anaerobic digestion, *Ultrasonics Sonochemistry*, 20, 587 - 594.
- [152] **Laurent, J., Casellas, M., Dagot, C.** (2009). Heavy metals uptake by sonicated activatedsludge: relation with floc surface properties. *Journal of Hazardous Materials*. 162, 652 - 660.
- [153] **Menardo, S., Airoidi, G., Balsari P.** (2012). The effect of particle size and thermal pretreatmenton the methane yield of four agricultural by-products. *Bioresource Technology*, 104, 708 - 714.
- [154] **Liang, Y., Cheng, B., Si, Y., Cao, D., Nie, E., Tang, J., Luo, X.** (2014). Physicochemical changes of rice straw after lime pretreatment and mesophilic dry digestion, *Biomass and Bioenergy*, 71, 106 - 112.

- [155] **Kaur, K., and Phutela, U.G.** (2016). Enhancement of paddy straw digestibility and biogas production by sodium hydroxide-microwave pretreatment. *Renewable Energy*, 92, 178 - 184.
- [156] **Jiang, D., Ge, X., Zhang, Q., Li, Y.** (2016). Comparison of liquid hot water and alkaline pretreatments of giant reed for improved enzymatic digestibility and biogas energy production, *Bioresource Technology*, 216, 60 - 68.
- [157] **Jaffar, M., Pang, Y., Yuan, H., Zou, D., Liu, Y., Zhu, B., Li, X.** (2016). Wheat straw pretreatment with KOH for enhancing biomethane production and fertilizer value in anaerobic digestion, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(3), 404 - 409.
- [158] **Safari, A., Karimi, K., & Shafiei, M.** (2017). Dilute alkali pretreatment of softwood pine: A biorefinery approach. *Bioresource Technology*, 234, 67 - 76.
- [159] **Shetty, D. J., Kshirsagar, P., Tapadia-Maheshwari, S., Lanjekar, V., Singh, S. K., Dhakephalkar, P. K.** (2017). Alkali pretreatment at ambient temperature: A promising method to enhance biomethanation of rice straw, *Bioresource Technology*, 226, 80-88.
- [160] **Ardıç, İ.** (2009), İnek gübresinden biyogaz üretim verimine termal, kimyasal ve termokimyasal önislemlerin etkilerinin araştırılması. *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (Doktora Tezi), 208s, Mersin.
- [161] **Oda, V., Korkmaz, M., Özkurt, E.** (2016). Büyüme eğrilerinin tahmininde kullanılan bazı sigmoidal modeller ve elde edilen biyolojik parametreler: Bertalanffy Modeli örneği. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 54-66.



## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel bilgiler**

Adı Soyadı	Halil ŞENOL
Doğum Yeri ve Tarihi	Bafra, 10.11.1991
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Giresun Üniversitesi Genetik ve Biyomühendislik Bölümü 28000, Giresun
E-posta Adresi	halilsenol@yahoo.com halilsenol1990@hotmail.com halilsenol1990@gmail.com

### **Eğitim ve Akademik Durumu**

Lise	Bafra Lisesi, 2007
Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2012
Yüksek Lisans	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2015
Doktora	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, 2019

### **İş Tecrübesi**

Giresun Üniversitesi	Araştırma Görevlisi, 2015
----------------------	---------------------------

### **Yayınlar**

Ulusal
Uluslararası