

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ZOR AYRIŞABİLEN KATI ATIKLARIN  
BİYOREAKTÖRLERDE PARÇALANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YONCA KILIÇ**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ZOR AYRIŞABİLEN KATI ATIKLARIN  
BİYOREAKTÖRLERDE PARÇALANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YONCA KILIÇ**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinatörlüğü tarafından 2020FEBE016 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**YONCA KILIÇ**

## ÖZET

**ZOR AYRIŞABİLEN KATI ATIKLARIN BİYOREAKTÖRLERDE  
PARÇALANMASI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YONCA KILIÇ  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. OSMAN NURİ AĞDAĞ))**

**DENİZLİ, TEMMUZ - 2022**

Biyoreaktör depolama sahaları, katı atıkların hızlı bir şekilde parçalanmasını ve metan gazı elde edilmesini sağlayan katı atık bertaraf yöntemidir. Sızıntı suyu resirkülasyonunun gerçekleştirildiği biyoreaktörler genellikle anaerobik olarak işletilir. Ancak, ayrıştırılan atıkların türüne göre farklı işletme şartlarında da çalıştırılabilirler.

Lignin ve selüloz içeriği yüksek olan atıkların biyolojik parçalanması oldukça zordur. Özellikle anaerobik şartlarda (üstelik nem eksikliği de varsa) bu tür atıklar neredeyse hiç ayrışmaya uğramaz.

Bu çalışmada; biyolojik olarak zor parçalanan, lignin-selüloz içeriği yüksek olan tarımsal katı atıkların semi-aerobik biyoreaktörlerde parçalanması ve metan gazı elde edilmesi araştırılmıştır. Bu amaçla iki adet laboratuvar ölçekli paslanmaz çelik simüle biyoreaktör kullanılmıştır. Biyoreaktörlere biyolojik olarak zor parçalanan tarımsal atıklardan ayçiçeği sapı, kekik atığı, fındık zürufu ve park-bahçe atıkları farklı oranlarda ve kentsel katı atıkların organik kısmı ile karıştırılarak yüklenmiştir. Biyoreaktörler farklı işletme koşullarında çalıştırılmıştır. Biyoreaktörlere yüklenen atıklarda selüloz, hemiselüloz, lignin ve başlangıç ve sonuç organik madde içeriklerine bakılmıştır. Sızıntı sularında pH, KOİ, BOİ, NH<sub>4</sub>-N, TKN gibi parametreler analiz edilmiş, toplam gaz ve metan gazı miktarları ölçülmüştür.

Başlangıçta biyoreaktörler anaerobik olarak işletilmiştir. Ayçiçeği sapının anaerobik biyoreaktörlerde parçalanması sonucu %43 organik madde giderimi olurken, semi-aerobik / anaerobik işletmede %60 organik madde giderimi gerçekleşmiştir. Bunun üzerine diğer tarımsal atıklar semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında ayrışmaya tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, genel olarak semi-aerobik ön işlem yapılmasının lignin ve selüloz içeriği yüksek tarımsal atıkların parçalanmasını hızlandırdığı, sızıntı suyu KOİ değerlerini düşürdüğü ve metan miktarını artırdığı söylenebilir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Zor ayrışabilen katı atık, Biyoreaktör, Semi-aerobik, Metan verimi, Tarımsal katı atık

## **ABSTRACT**

### **DECOMPOSITION OF LOW BIODEGRADABLE SOLID WASTES IN BIOREACTORS**

**MSC THESIS**

**YONCA KILIÇ**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. OSMAN NURİ AĞDAĞ)**

**DENİZLİ, JULY 2022**

Bioreactor landfills are a solid waste disposal method that supply rapid solid waste degradation and methane acquirement. Bioreactors in which leachate circulation is carried out are generally operated anaerobically. However, they can also be operated under different operating conditions, depending on the type of solid waste.

The biodegradation of wastes with high lignin and cellulose content is very difficult. Especially in anaerobic conditions (moreover, if there is a lack of moisture), such wastes almost never decompose.

In this study, the degradation of agricultural solid wastes which are difficult to biodegrade and have high lignin-cellulose content, and the production of methane gas in semi-aerobic bioreactors have been investigated. For this purpose, two laboratory scale stainless steel simulated bioreactors were used. Sunflower stalk, thyme waste, hazelnut husk and park-garden wastes, which are difficult to biodegrade, were loaded into the bioreactors in different proportions and mixed with the organic fraction of municipal solid waste (OFSWM). The bioreactors were operated under different operating conditions. The contents of cellulose, hemicellulose, lignin, and initial and final organic matter in the wastes loaded into the bioreactors were examined. Parameters such as pH, COD, BOD, NH<sub>4</sub>-N, TKN in the leachate were analyzed, and the amounts of total and methane gas were measured.

Initially, all bioreactors were operated anaerobically. In the decomposition of the sunflower stem, while 43% of organic matter removal was achieved in anaerobic bioreactor, 60% of organic matter removal was realized in the semi-aerobic / anaerobic bioreactor. Thereupon, other agricultural wastes were subjected to decomposition under semi-aerobic / anaerobic operating conditions. As a result of the study, it can be said that semi-aerobic pretreatment accelerates the breakdown of agricultural wastes with high lignin and cellulose content, decreases the COD values of leachate and increases the amount of methane.

**KEYWORDS:** Low biodegradable waste, Bioreactor, Semi-aerobic, Methane efficiency, Agricultural solid waste

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ .....	viii
SEMBOL LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	4
2.1    Katı Atıklar .....	4
2.2    Katı Atıkların Sınıflandırılması .....	5
2.2.1    Evsel Katı Atıklar .....	6
2.2.2    Park-Bahçe Atıkları .....	7
2.2.3    Tarımsal Katı Atıklar .....	7
2.2.3.1    Bitkisel Üretim Esnasında ya da Sonrasında Meydana Gelen Atıklar .....	8
2.2.3.2    Tarımsal Ürünlerin Üretilmesi Esnasında ya da Sonrasında Meydana Gelen Atıklar .....	10
2.3    Tarımsal Atıklarla İlgili Yapılan Çalışmalar .....	12
2.4    Katı Atık Bertaraf Yöntemleri .....	16
2.4.1    Yakma .....	16
2.4.2    Pirroliz .....	17
2.4.3    Kompostlaştırma .....	18
2.4.3.1    Kompostlaştırma ile ilgili Yapılan Çalışmalar .....	19
2.4.4    Düzenli Depolama .....	21
2.4.5    Biyoreaktör Depolama Sistemleri .....	22
2.4.5.1    Katı Atıkların Anaerobik Parçalanması .....	24
2.4.5.2    Anaerobik Biyoreaktör Depolama .....	27
2.4.5.3    Katı Atıkların Aerobik Parçalanması .....	29
2.4.5.4    Aerobik Biyoreaktör Depolama .....	30
2.4.5.5    Fakültatif Biyoreaktör Depolama .....	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	39
3.1    Laboratuvar Ölçekli Simüle Biyoreaktör .....	39
3.2    Biyoreaktör İşletme Sistemleri .....	40
3.2.1    Anaerobik İşletme Koşulları .....	40
3.2.2    Semi-aerobik / anaerobik İşletme Koşulları .....	41
3.3    Reaktörlere Atıkların Yüklenmesi .....	43
3.3.1    Ayçiçeği Sapının Anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi .....	43
3.3.2    Ayçiçeği Sapının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi .....	45
3.3.3    Kekik Atığının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi .....	47

3.3.4	Park-Bahçe Atıklarının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi .....	49
3.3.5	Fındık Zürafunun Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi .....	51
<b>4.</b>	<b>ANALİTİK YÖNTEMLER.....</b>	<b>53</b>
4.1	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Ölçümü .....	53
4.2	pH .....	54
4.3	Uçucu Yağ Asidi .....	54
4.4	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ <sub>5</sub> ) Ölçümü .....	55
4.5	Amonyum Azotu (NH <sub>4</sub> -N) Analizi .....	56
4.6	Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) Tayini.....	57
4.7	Toplam Gaz Ölçümü .....	58
4.8	Metan Gazı Ölçümü .....	59
4.9	Su Muhtevası ve Organik Madde Analizi .....	60
4.10	Kimyasal Analiz .....	60
4.10.1	Ekstraktif Madde Tayini .....	60
4.10.2	Hemiselüloz Tayini .....	61
4.10.3	Lignin Tayini .....	62
4.10.4	Selüloz Tayini .....	63
<b>5.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>65</b>
5.1	Ayçiçeği Sapının Anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması .....	65
5.1.1	Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi	65
5.1.2	Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimi .....	67
5.1.3	Biyoreaktör Sızıntı Sularında UYA Konsantrasyonları Değişimi	68
5.1.4	Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı.....	70
5.1.5	Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi. ....	71
5.1.6	Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH <sub>4</sub> -N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi.....	73
5.1.7	Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ <sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi... 75	
5.1.8	Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi .....	76
5.2	Ayçiçeği Sapının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması.....	77
5.2.1	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Değişimleri .....	77
5.2.2	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri .....	79
5.2.3	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı .....	80
5.2.4	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi.....	81
5.2.5	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH <sub>4</sub> -N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi .....	83
5.2.6	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ <sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi.....	85
5.2.7	Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi .....	86
5.3	Kekik Atığının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması.....	87

5.3.1	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Değişimleri .....	87
5.3.2	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri .....	88
5.3.3	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı .....	89
5.3.4	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi.....	90
5.3.5	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH <sub>4</sub> -N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi .....	92
5.3.6	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ <sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi.....	93
5.3.7	Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi .....	94
5.4	Park-Bahçe Atıklarının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması.....	95
5.4.1	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi .....	95
5.4.2	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri .....	96
5.4.3	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı .....	97
5.4.4	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi.....	98
5.4.5	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH <sub>4</sub> -N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi .....	100
5.4.6	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ <sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi.....	102
5.4.7	Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi .....	103
5.5	Fındık Zürufunun Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması.....	103
5.5.1	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi .....	104
5.5.2	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri .....	106
5.5.3	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı .....	106
5.5.4	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi.....	107
5.5.5	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH <sub>4</sub> -N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi .....	109
5.5.6	Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ <sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi.....	110
5.5.7	Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi .....	111
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>113</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>118</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>131</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Türkiye’de katı atık karakterizasyonu .....	5
Şekil 2.2: Dünya genelinde oluşan kentsel katı atık miktarları.....	6
Şekil 2.3: Anaerobik arıtmanın adımları .....	24
Şekil 2.4: Anaerobik biyoreaktör tasarımı .....	29
Şekil 2.5: Aerobik biyoreaktör tasarımı .....	31
Şekil 2.6: Fakültatif biyoreaktör tasarımı.....	33
Şekil 2.7: Anaerobik, aerobik ve fakültatif deponi BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonu karşılaştırılması .....	33
Şekil 3.1: Laboratuvar ölçekli simüle biyoreaktör .....	39
Şekil 3.2: Anaerobik biyoreaktörün çalışma sistemi.....	41
Şekil 3.3: Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörün çalışma sistemi (Havalandırma pompası kullanımı).....	42
Şekil 3.4: Ayçiçeği sapının anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi.....	43
Şekil 3.5: Ayçiçeği sapının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi .....	45
Şekil 3.6: Kekik atığının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi .....	47
Şekil 3.7: Park-bahçe atıklarının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi .....	49
Şekil 3.8: Fındık zürufunun semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi .....	51
Şekil 4.1: Termoreaktör .....	53
Şekil 4.2: pH metre .....	54
Şekil 4.3: BOİ <sub>5</sub> analizinde kullanılan ekipmanlar.....	56
Şekil 4.4: Distilasyon ünitesi .....	57
Şekil 4.5: Azot-protein cihazı .....	58
Şekil 4.6: Toplam gaz ölçüm düzeneği .....	59
Şekil 4.7: Metan ölçüm düzeneği.....	59
Şekil 4.8: Ekstraksiyon işlemi.....	61
Şekil 4.9: Hemiselüloz tayini .....	62
Şekil 4.10: Etüv sonrası sabit tartıma getirilen numuneler .....	62
Şekil 4.11: Geri soğutma işleminden sonra numuneler .....	63
Şekil 5.1: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi.....	67
Şekil 5.2: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi .....	68
Şekil 5.3: Biyoreaktör sızıntı suyu UYA konsantrasyonları değişimi .....	70
Şekil 5.4: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı .....	71
Şekil 5.5: Reaktör <sub>1</sub> ’de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi	73
Şekil 5.6: Reaktör <sub>2</sub> ’de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi	73
Şekil 5.7: Biyoreaktör sızıntı suyu NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonları değişimi .....	74

Şekil 5.8: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi .....	75
Şekil 5.9: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi.....	79
Şekil 5.10: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimleri .....	80
Şekil 5.11: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı .....	81
Şekil 5.12: Reaktör A <sub>1</sub> 'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi.....	83
Şekil 5.13: Reaktör B <sub>1</sub> 'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi.....	83
Şekil 5.14: Biyoreaktör sızıntı suyu NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonları değişimi .....	84
Şekil 5.15: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi.....	85
Şekil 5.16: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi.....	88
Şekil 5.17: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi .....	89
Şekil 5.18: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı .....	90
Şekil 5.19: Reaktör C'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi .....	91
Şekil 5.20: Reaktör D'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi.....	91
Şekil 5.21: Biyoreaktör sızıntı suyu NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu değişimi.....	92
Şekil 5.22: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi.....	96
Şekil 5.23: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimleri .....	97
Şekil 5.24: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı .....	98
Şekil 5.25: Reaktör E'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi .....	100
Şekil 5.26: Reaktör F'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi .....	100
Şekil 5.27: Biyoreaktör sızıntı suyu NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu değişimi.....	101
Şekil 5.28: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonu değişimi.....	101
Şekil 5.29: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi.....	105
Şekil 5.30: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi .....	106
Şekil 5.31: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı .....	107
Şekil 5.32: Reaktör G'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi .....	108
Şekil 5.33: Reaktör H'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi .....	108
Şekil 5.34: Biyoreaktör sızıntı suyu NH <sub>4</sub> -N konsantrasyonu değişimi.....	109
Şekil 5.35: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonu değişimi.....	110

# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

Tablo 2.1: Çeşitli lignoselülozların kimyasal bileşimi.....	10
Tablo 2.2: 2017 yılında Türkiye’de yetiştirilen ürünler ve oluşan atık miktarları .....	11
Tablo 2.3: Çeşitli biyokütle kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz oranı .....	11
Tablo 3.1: Biyoreaktörlerin özellikleri.....	39
Tablo 3.2: Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi	44
Tablo 3.3: Ayçiçeği sapındaki lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%).....	44
Tablo 3.4: Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri .....	44
Tablo 3.5: Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi	46
Tablo 3.6: Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri .....	46
Tablo 3.7: Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi	48
Tablo 3.8: Kekik atığının lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%).....	48
Tablo 3.9: Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri .....	48
Tablo 3.10: Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi .....	50
Tablo 3.11: Park-bahçe atığının lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%).....	50
Tablo 3.12: Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri .....	50
Tablo 3.13: Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi .....	52
Tablo 3.14: Fındık zürufunun lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%).....	52
Tablo 3.15: Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri .....	52
Tablo 5.1: Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi .....	76
Tablo 5.2: Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi.....	77
Tablo 5.3: Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi .....	86
Tablo 5.4: Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi.....	86
Tablo 5.5: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi .....	93
Tablo 5.6: Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi .....	94
Tablo 5.7: Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi.....	94
Tablo 5.8: Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi .....	102
Tablo 5.9: Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi.....	103
Tablo 5.10: Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ <sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi .....	111
Tablo 5.11: Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi.....	111
Tablo 5.12: Biyoreaktör içeriklerinde yapılan analiz sonuçları .....	112
Tablo 6.1: Biyoreaktör sızıntı suyu analiz sonuçları.....	114

## SEMBOL LİSTESİ

<b>BOİ</b>	:	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı
<b>CO<sub>2</sub></b>	:	Karbondioksit
<b>CH<sub>4</sub></b>	:	Metan
<b>C/N</b>	:	Karbon azot oranı
<b>F/M</b>	:	Besin mikroorganizma oranı
<b>H<sub>2</sub></b>	:	Hidrojen
<b>H<sub>2</sub>S</b>	:	Hidrojen sülfür
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	:	Sülfirik asit
<b>K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub></b>	:	Potasyum dikromat
<b>KOİ</b>	:	Kimyasal oksijen ihtiyacı
<b>OFMSW</b>	:	Organik fraksiyonlu kentsel katı atık
<b>N<sub>2</sub>O</b>	:	Nitröz oksit
<b>N<sub>2</sub></b>	:	Azot
<b>NaCl</b>	:	Sodyum klorür
<b>NaHCO<sub>3</sub></b>	:	Sodyum bikarbonat
<b>NaOH</b>	:	Sodyum hidroksit
<b>NO<sub>2</sub></b>	:	Nitrit
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	:	Nitrat
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	:	Amonyum azotu
<b>PAÜ</b>	:	Pamukkale Üniversitesi
<b>TKN</b>	:	Toplam Kjeldahl Azotu
<b>TÜİK</b>	:	Türkiye İstatistik Kurumu
<b>UYA</b>	:	Uçucu Yağ Asitleri

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sırasında, bu araştırmanın yürütülmesinde geçen deneysel çalışmalarım, tez yazımım, göstermiş olduğu destek, yardım ve katkılarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Osman Nuri AĞDAĞ'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatımın her anından yanımda olan, beni maddi ve manevi her şekilde destekleyen biricik annem ve kardeşlerime teşekkürlerimi bir borç bilirim.



# 1. GİRİŞ

Türkiye’de en büyük çevre problemlerinden biri katı atıklardan kaynaklanan problemlerdir. Nüfusun her geçen gün hızlı bir şekilde artması ve çevre bilincinin gelişmemesinden dolayı katı atıkların oluşumu ve miktarı da artış göstermiştir (Neyim 2008). Kentleşme ve nüfus artışı sonucunda artan enerji tüketimi ve fosil yakıtların aşırı tüketimi dünyada da ciddi çevre sorunlarına yol açmıştır (Amiri ve Karimi 2015).

Biyokütle, biyoyakıt, biyoelektrik ve ısı üretimi için kullanılabilir umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Enerji kaynaklarının tükenmesi ve çevresel kalitenin bozulması, küresel sürdürülebilir kalkınmayla ilgili esas olarak iki önemli sorundur. Fosil yakıtların öngörülebilir sonu nedeniyle, enerji krizi, dünyanın bugün karşı karşıya kaldığı en önemli zorluk, aynı zamanda da fırsat olarak görülmektedir. 2015 yılında Birleşmiş Milletler, daha iyi bir sürdürülebilir gelecek gerçekleştirmek için toplam 17 sürdürülebilir kalkınma hedefi içeren bir plan önermiştir. Bunlardan biri de ekonomik ve temiz enerjinin sağlamasıdır (UN 2015). Nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler, küresel enerji talebinde dikkat çekici bir artışa yol açmıştır (Luo ve Weng 2019). Bu enerji talebi tarımsal atıklar gibi lignoselülozik atıklardan biyogaz üretimi yoluyla karşılanabilir (Salehi ve diğ. 2012).

Organik atıkların anaerobik fermantasyonu, temiz enerji üretimi ve uygun maliyetli atık arıtma gibi birçok avantaja sahiptir. Geleneksel olarak, gıda ve tarım atıkları gibi organik atıkların çoğu yakılır, kompost haline getirilir veya depolanır. Bu süreçler tipik olarak, atıkları bertaraf etmek için önemli miktarda enerji girdisi veya yüksek karbon ayak izi gerektirir (Duque-Acevedo ve diğ. 2020). Bununla birlikte, yakılan yada atılan tarımsal atıklar havayı ve suyu kirletmekte ve tarımsal ürün güvenliği ve çevre güvenliği için büyük bir tehdit oluşturan sera etkisini artırılmaktadır (Lim ve diğ. 2016). Bu nedenle, tarımsal atıkların etkin bir şekilde bertarafı önem arz etmektedir. Aslında tarımsal atıklar, selüloz, hemiselüloz, lignin vb. gibi zengin organik maddeleri nedeniyle kaynak kullanımı için büyük potansiyele sahiptir. Daha da önemlisi, tarımsal atıkların fosil yakıtlara kıyasla yenilenebilir

olmasıdır (Zhang ve diğ. 2020). Anaerobik çürütme, biyolojik atıklardaki organik maddelerin kullanımının yanı sıra sürdürülebilir kalkınma hedeflerini karşılamak için temiz enerji (yani biyogaz) üretimi için bir alternatif olarak düşünülmüştür. Anaerobik çürütme süreci biyolojik atıklardaki organik bileşenleri yararlı biyoenerji ve biyogübrelere dönüştürebilir, böylece döngüsel bir biyoekonomi elde edebilir (Duque-Acevedo ve diğ. 2020).

Geleneksel tarımsal üretimde, tarımsal atıkların bertaraf edilmesinde yakma ve atma başlıca yöntemlerdir (Demirbaş 2011). Tarımsal atıkların yakılması ve atılması kaynak israfıdır. Doğal kaynakların yüksek organik madde içerikleri ile bünyelerinde bulunan enerji potansiyelleri geri dönüşümü günümüzde önemli bir hale getirmektedir. Tarımsal atıkların da yüksek organik madde içeriği nedeni ile değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Dünya nüfusunun giderek hızlı bir şekilde arttığı ve artan nüfusa paralel olarak da beslenme ihtiyacının artmasıyla birlikte tarımsal ürünlerin üretiminin artırılması ve birim alandan daha fazla ürün elde edilebilmesi gerekliliği tarımsal atıkların değerlendirilmesi konusunu daha da önemli hale getirmiştir. Türkiye’de artan enerji ihtiyacıyla birlikte tarımsal atıkların enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi son derece önemlidir. Özellikle tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle kaynakları var olan potansiyelin değerlendirilmesini sağlamaktadır (Çolakoğlu 2018).

Literatürde yüksek lignin ve selüloz içeriğine sahip atıkların parçalanma işleminin gerçekleşmesi için çeşitli ön işlemlerin kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır. Bu ön işlemlere örnek olarak ısı ön işlem (Phuttaro ve diğ. 2019), farklı aşu numuneleri (Pellera ve Gidarakos 2016) ve kimyasal maddelerin birlikte kullanımı (Shen ve diğ. 2019) ile ilgili çalışmalar verilebilir.

Tarımsal katı atıklar denildiğinde ilk etapta akla, kullanılan gübre ve zirai ilaç ambalajları gelmektedir. Ancak asıl olarak tarımsal atıkların üretim esnasında ve sonrasında oluşan, genellikle organik içerik açısından çoğunlukla da lignin selüloz içeriği açısından zengin atıklar olduğu bilinmektedir.

Bu tez kapsamında ayçiçeği sapı, kekik atığı, park-bahçe atığı ve fındık zürufu gibi tarımsal katı atıklar herhangi bir kimyasal ön işlem uygulanmadan sadece fiziksel olarak boyut küçültme yapılarak, anaerobik, semi-aerobik / anaerobik

biyoreaktörlerde parçalanması ve metan üretimi gibi birçok parametre incelenmiştir. Bu atıkların tek başına veya karışım halinde verimlerinin tespit edilmesi de çalışmanın amaçları arasındadır. Zor parçalanabilir atıkların biyobozunumuna kentsel organik katı atıkların ilave edilmesinin, bu atıkların kendi içinde farklı oranlarda karıştırılmasının ve biyoreaktörlerde farklı işletme koşulları uygulanmasının etkisinin nasıl olduğunun incelenmesi ve metan üretiminin gözlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması süresince laboratuvar ölçekli paslanmaz çelik biyoreaktörlerdeki sızıntı suyunda KOİ, pH, UYA, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> değerleri, biyoreaktörlerde kullanılan atık karışımlarında ise çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde analizleri yapılmıştır. Reaktörlerde kullanılan tarımsal atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunların yanı sıra reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı ölçülmüştür.

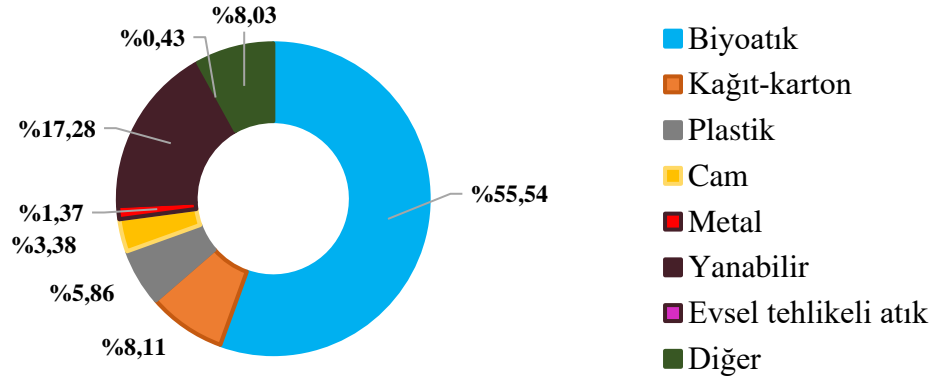
## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Katı Atıklar

Türkiye’de katı atık kavramı 2872 sayılı Çevre Kanunu’nda, “Üreticisi tarafından atılmak istenen ve toplumun huzuru ile özellikle çevrenin korunması bakımından, düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı atık maddelerdir” şeklinde tanımlanmıştır (Çevre Kanunu 1983).

Katı atıklar, sanayi tesislerinde ürünlerin işlenmesi ve üretilmesi sonucunda veya tarımsal ürünlerin üretilmesi esnasında, ürünlerin üretilmesinden sonra ve üretilen ürünlerin kullanım aşamasında ya da kullanıldıktan sonra ortaya çıkan atıklardır. Bu atıkların doğrudan veya dolaylı olarak doğal ortama kontrolsüz bir şekilde bırakılması, insanların ve diğer canlıların yaşam alanlarına ve sağlıklarına zarar vermektedir. Bu nedenle, çevre, sağlık ve görüntü kirliliğine neden olan, sıvı ya da gaz halinde olmayan her türlü madde katı atık sınıfının içerisinde değerlendirilmektedir (Gündüzalp ve Güven 2016).

Türkiye’de bir günde yaklaşık olarak bir kişinin ürettiği atık miktarı 1,17 kg olarak hesaplanmıştır. Ülke genelinde üretilen atık miktarı ise yılda 31 milyon tondur (Öztürk 2010). Ülkemizde katı atıklar, miktarlarının fazla olması ve kirlilik potansiyellerinin yüksek oluşu nedeniyle önemli çevre sorunları arasında görülmektedir. Avrupa’da, toplam kentsel katı atıkların %50’si gıda atığı iken, gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde bu atıklar, toplam kentsel katı atığın %55’ini oluşturmaktadır (Thi ve diğ. 2015). Türkiye’de katı atıkların önemli bir kısmını (yaklaşık %55) biyoatıkların oluşturduğu belirlenmiştir. Türkiye’de üretilen atık bileşenlerinin yüzdesi Şekil 2.1’de görülmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017).



Şekil 2.1: Türkiye’de katı atık karakterizasyonu

## 2.2 Katı Atıkların Sınıflandırılması

Katı atıklar genellikle oluştuıkları yerlere göre adlandırılırlar. Genel olarak bunlar;

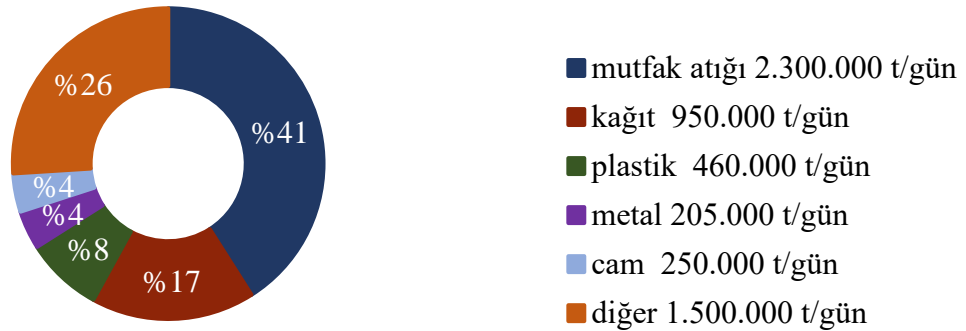
- Eysel katı atıklar
- Tıbbi katı atıklar
- Tehlikeli katı atıklar
- Endüstriyel katı atıklar
- Tarımsal atıklar
- Park-bahçe atıkları
- İnşaat ve hafriyat atıklarıdır.

Yürütülen tez kapsamında yukarıda yazılan atık türlerinden sadece evsel atıklar ile tarımsal ve park-bahçe atıkları üzerine çalışılmıştır.

### 2.2.1 Evsel Katı Atıklar

Günlük yaşamsal faaliyetlerimiz sonucunda evde oluşan tehlikeli ve zararlı özellik bulundurmayan her türlü atık evsel katı atıklar kapsamına girmektedir. Evsel katı atıklar, organik atıklar ve ambalaj atıkları olarak ikiye ayrılmaktadır. Evimizde kullandığımız sebze, meyve, ekmek, yemek kalıntıları gibi atıklar organik atıklardır (Sayar 2012). Evsel atıklardaki organik atık miktarı toplam ağırlığın %50-70'ini oluşturur (Y. Wang ve diğ. 2021). Gıda malzemelerinin konulduğu cam kavanozlar, su şişeleri, şampuan, deterjan, sabun kapları ise evimizden çıkan ambalaj atıklarına örnek olarak verilebilmektedir. Evlerimizde kullanım ömrünü tamamlamış tabak, bardak, halı, yorgan, nevresim, kıyafet gibi birçok eşya da evsel katı atıklar içerisinde kabul edilmektedir. Ev ortamında meydana gelmeyen fakat karakteristik olarak aynı ya da benzer özellikler gösteren büro, okul, pazar yeri, ibadethane vb. yerlerden çıkan atıklar da evsel katı atıklar grubunda ele alınmaktadır (Sayar 2012).

Büyük kentlerde yaşanan en büyük sorunlarından biri evsel katı atıklardır. Bu atıkların toplanması, depolanması ve bertaraf işlemlerinin herhangi bir aşamasında oluşan problemler çevreye ciddi ölçüde tahrip edebilmekte ve çeşitli bulaşıcı hastalığın yayılmasına sebep olarak toplum sağlığını tehdit eden bir durum olarak karşımıza çıkabilmektedir. Ayrıca tüm atıklarda olduğu gibi evsel katı atıkların da toplanma, depolanma, uzaklaştırma işlemleri yerel yönetimlerin ekonomik giderleri arasında oldukça önemli bir paya sahiptir (Çolakoğlu 2018). Dünya’da oluşan kentsel katı atık miktar ve bileşenleri Şekil 2.2’de gösterilmektedir (Gülmez 2016). Şekil 2.2 incelendiğinde kentsel atıkların %41’i yüksek organik madde içeriğine sahip mutfak atıklarından oluşmaktadır.



Şekil 2.2: Dünya genelinde oluşan kentsel katı atık miktarları

### 2.2.2 Park-Bahçe Atıkları

Park-bahçe atıklarının biyolojik olarak parçalanabilen kısmı, Avrupa kataloğunda 200,201 atık koduyla sınıflandırılan yüksek hacimli bir kaynak akışı olarak kabul edilir (Eades ve diğ. 2020).

Bahçe atıkları, farklı organik (ör. çim ve çiçek budamaları, çit budamaları, ağaç budamaları, küçük dallar, düşen yapraklar ve ağaç artıkları) ve inorganik (ör. toprak ve taşlar) maddelerden oluşur ve özel bahçelerin ve kamusal alanların bakımı sırasında meydana gelen atıklardır (ten Hoeve ve diğ. 2019).

Yeşil park ve bahçe atıkları, çim kupürleri, çit budamaları, yaprak ve ağaç kabuğu, çiçekler, dallar, ince dallar ve diğer odunsu maddeler gibi organik maddeler ile toprak ve taş gibi inorganik fraksiyonların ve yabancı cisimlerin karışımından oluşur (örneğin kâğıt ve karton, cam, sigara izmaritleri veya teneke kutular). Bununla birlikte, bileşimi mevsime, yere ve ayrıca atık yönetim stratejilerine göre değişen bir lignoselülozik biyokütle olarak kabul edilebilir (Bary ve diğ. 2005).

Park-bahçe atık yönetiminin iki ana teknolojisi vardır, aerobik çürütme ile kompostlaştırma yapılabilir (Reyes-Torres ve diğ. 2018) ya da anaerobik çürütme ile biyoenerjiye dönüştürülebilir (Hla ve Roberts 2015).

### 2.2.3 Tarımsal Katı Atıklar

Tarımsal atıklar, hayvan gübresi gibi hayvan atıkları, mahsul samanı gibi bitki atıkları ve meyve kabuğu gibi evsel çöplerin yanı sıra meyve kabuğu gibi işleme artıklarıdır (He ve diğ. 2019). Tarımsal katı atıklar, meyve, sebze gibi atıkların yanı sıra et, kümes hayvanları, süt ve süt ürünleri ile diğer hayvansal ürünlerin yetiştirilmesi ve işlenmesinden kaynaklı, ekonomik değeri toplama, taşıma ve endüstriyel işleme maliyetlerinden oluşan üretim dışı çıktılarıdır (Loehr 1978).

Tarımsal atıkların veya mahsul artıklarının yakılmasının ciddi bir sağlık riski oluşturduğu düşünülmektedir (Nagendran 2011). Bu tür atıkların yakılması yakın çevredeki çoğu kişiyi yüksek miktarlarda partikül maddeye maruz bırakmanın yanı sıra

sıra, aynı zamanda bölgesel kirliliğe de sebep olmaktadır (Bhuvaneshwari ve diğ. 2019). Tarımsal kalıntıların biyokütle olarak kullanılması, çevreye zarar vermemek ve yenilenebilir enerji sağlamak için verimli bir atık bertaraf sistemi olarak kabul edilir (Z. Wang ve diğ. 2017). Tarımsal atıkların yeniden geri kazanılması belirli bir plan ve teknik çerçevede, uzman kişiler tarafından hazırlanmış ulusal ve uluslararası çevre ve tarım politikalarına uygun bir şekilde yürütülmelidir. Tarımsal atıkların değerlendirilmesi çevre sorunlarını azaltıp, hammadde rezervlerini korunması ve ekonomik açıdan kalkınma sağlayabilecektir. Her atık türünde olduğu gibi tarımsal atıkların da çeşidi ve türü farklılık gösterdiğinden değerlendirme işlemleri atık çeşidine göre farklılık göstermektedir (Akırmak 2010).

Tarımsal atıklar 3 gruba ayrılırlar;

- Hayvansal üretim esnasında ya da sonrasında meydana gelen atıklar,
- Bitkisel üretim esnasında ya da sonrasında meydana gelen atıklar,
- Tarım ürünlerinin üretilmesi esnasında ya da sonrasında meydana gelen atıklardır (Akırmak 2010).

Tez çalışması kapsamında tarımsal ürünlerin hasadı sonrasında meydana gelen atıklar kullanılmıştır.

### **2.2.3.1 Bitkisel Üretim Esnasında ya da Sonrasında Meydana Gelen Atıklar**

Sebze ve meyve gibi bitkisel ürün yetiştirmek amacı ile toprağın işlenmeye başlanmasından itibaren başlayan, bitkisel üretim için ekim ve dikim işlemlerinin gerçekleştirilmesi esnasında ve sonrasında meydana gelen atıklardır. Orman, nadas alanı, meyve ve sebze ekili alanlarda yapılan bitkisel üretimler bu grup içerisinde değerlendirilebilmektedir. Saman, sap, yaprak, sömek, kabuk, çekirdek, budama atığı vb. bu atıklara örnek verilebilir (Eskicioğlu 2013).

Meyve ve sebze atıkları sırasında oluşan atık bileşimi, seçilen hammaddeye bağlı olarak meyve kabuğu, tohum, mahsul, yaprak, saman, gövde, kök veya yumru

şeklinde olabilir (Son ve diğ. 2017). Bitki türlerine ve dokularına bağlı olarak meyve ve sebze atıklarından elde edilen atıklar çok çeşitli özelliklere sahiptir (Ganesh ve diğ. 2022). Gıda atıkları, özellikle meyve ve sebze atıkları, enerji sağlamak için büyük potansiyele sahip, kullanılmayan bir kaynak olarak kabul edilir. Bu enerji kaynakları çevresel etkileri azaltır, doğal kaynakların tükenme riskini en aza indirir ve insan sağlığı üzerinde en az etkiye neden olur (Pham ve diğ. 2015).

Bitki biyokütlesi esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninle daha az miktarda pektin, protein, ekstraktifler (şekerler, azotlu materyal, klorofil ve mumlar gibi çözünen yapısal olmayan materyaller) ve inorganik minerallerden oluşur (Jorgensen ve Kristensen 2007). Tarımsal atıkları oluşturan bitkilerin, koçan, gövde ve saplarının hücre duvarları selüloz, hemiselüloz ve lignin polimerlerinden meydana gelir ve bu üçlü yapıya lignoselülozik yapı adı verilir. Lignoselüloz (ekinler, bitkiler ve odunlar) esas olarak selüloz ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, hemiselüloz ( $C_5H_{10}O_5$ )<sub>m</sub> ve lignin ( $C_{10}H_{11}O_{3,5}$ ) dahil olmak üzere üç temel bileşenden oluşur (Jamil ve diğ. 2020). Selüloz, β-1, 4-glikosid bağlarla bağlanan D-glikoz birimlerinden oluşan bir polimerdir (Cao ve diğ. 2017). Hemiselüloz, ksiloz, mannoz, glikoz, galaktoz ve arbinos, vb. gibi monomerlerden oluşan bir hetero-polisakkarittir. Hemiselüloz, furfural ve 5-hidroksi metil furfural oluşturmak üzere dehidre edilen iki ana monosakkarit, pentoz ve heksoza hidrolize edilebilir (Gao ve diğ. 2016). Lignin, benzen propan birimlerinin farklı bağlantılar (eter ve karbon-karbon bağları) yoluyla birleştirilmesiyle oluşturulan anizotropik özelliklere sahip amorf bir aromatik polimer bileşimidir. Selüloz ve hemiselüloz ile karşılaştırıldığında lignin karmaşık bir yapıya ve çok çeşitli moleküler ağırlık dağılımına sahiptir (Sun ve diğ. 2018). Çeşitli lignoselülozlardaki lignin, hemiselüloz ve selülozun bileşimsel miktarı Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Her bileşenin ağırlık yüzdesi lignoselülozların türünden türüne değişmektedir.

**Tablo 2.1:** Çeşitli lignoselülozların kimyasal bileşimi

<b>Lignoselüloz</b>	<b>Selüloz (%)</b>	<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Referans</b>
Yonca	21,8	12,4	9,7	(Van Dyk & Pletschke, 2012)
Mısır koçanları	33,7-41,2	31,9-36	6,1-15,9	(Mussatto & Dragone, 2016)
Pamuk sapı	67	16	13	(Kim ve diğ. 2016)
Çimenler	25-40	25-50	10-30	(Van Dyk & Pletschke, 2012)
Yapraklar	15-20	80-85	0,0	(Van Dyk & Pletschke, 2012)
Fındık kabukları	25-30	25-30	30-40	(Van Dyk & Pletschke, 2012)
Kavun kabukları	35	19	30	(Van Dyk & Pletschke, 2012)
Ayçiçeği sapları	36,27	10,6	18,34	(de Souza ve diğ. 2020)
Fındık Zürufu	34,5	20,6	35,1	(Ceylan & Topçu, 2014)

### **2.2.3.2 Tarımsal Ürünlerin Üretilmesi Esnasında ya da Sonrasında Meydana Gelen Atıklar**

Tarımsal ürünlerin üretimi maksadı ile toprağın işlenmeye başlamadan önce kurutma, öğütme, ayıklama esnasında oluşan sap, saman, çekirdek vb. ile oluşumu başlayan atıklardır. Toprak işlenirken ve işlendikten sonra tarımsal ürünün toprağa ekildiği andan itibaren büyüme, gelişme ve hasat döneminde ve sonrasında meydana gelen her türlü sap, saman, çekirdek, kök, yaprak, dal gibi atıklar tarım ürünlerinin işlenmesiyle birlikte ortaya çıkan atıklar arasında yer almaktadır (Şanlı 2014).

Türkiye’de yetiştirilen bazı tarımsal ürünlerin ekildikleri alanlar ve üretim miktarları Tablo 2.2’de (TÜİK 2017) verilmiştir. Türkiye hububat üretimi yüksek olan bir ülkedir. Üretilen hububat ürünlerinden elde edeceği biyokütleleri kullanarak biyogaz elde edebilir. Tablo 2.2 incelendiğinde ayçiçeği dışındaki tarımsal ürünler hayvancılıkta kullanılmaktadır. Ayçiçeğinden elde edilen ve neredeyse üretimin

%90'lık kısmını oluşturan atıkların, atıl durumda olduğu ve katma değeri olan ürünlere dönüştürülmesi oldukça önemlidir.

**Tablo 2.2:** 2017 yılında Türkiye’de yetiştirilen ürünler ve oluşan atık miktarları

Yetiştirilen Ürün	Ekilen Alan (Da)	Üretim Miktarları (Ton)	Atık Miktarı (Ton)
Buğday	76.688.785	21.500.000	283.745
Arpa	24.247.372	7.100.000	872.905
Mısır	6.390.844	5.900.000	3.374.366
Ayçiçeği	<b>7.796.217</b>	<b>1.964.385</b>	<b>1.933.462</b>
Pamuk	5.018.534	2.450.000	431.594

Tablo 2.3’te tarımsal atıklardan elde edilecek biyogaz verimi gösterilmiştir (Koçer Nacar ve Ayhan 2007). Atıklar incelendiğinde genel olarak metan oranlarının %50-80 arasında değişkenlik gösterdiği gözlenmektedir. Arpa, buğday, tütün, pamuk, çeltik vb. gibi tarım ürünlerinin anaerobik fermente edilmesi sırasında ortaya çıkan metan oranı %60’tır. Bu nedenle tarımsal atıklar da tek başlarına ya da başka atık çeşitleri ile biyogaz üretiminde kullanılabilir.

Türkiye’de her yıl oluşan tarımsal ve hayvansal nitelikleri katı atıkların sadece %60’ı enerji üretimi için kullanılabilir özellikleri taşımaktadır. Tarımsal ve hayvansal atıklardan elde edilebilecek bu enerjinin, Türkiye’nin yıllık enerji harcamasının %22-27’ sine eş değer olduğu tahmin edilmektedir (Doğan 2000).

**Tablo 2.3:** Çeşitli biyokütle kaynaklardan elde edilebilecek biyogaz oranı

Kaynak	Biyogaz Verimi (L/kg)	Metan Oranı (Hacmin yüzdesi)
Sığır gübresi	90-310	65
Kanatlı Gübresi	310-620	60
Domuz Gübresi	340-550	65-70
Buğday Samanı	200-300	50-60
Çavdar Samanı	200-300	59
Arpa Samanı	290-310	59
Mısır sapları ve artıkları	380-460	59
Keten& Kenevir	360	59
Çimen	280-550	70
Sebze Artıkları	<b>330-360</b>	<b>Değişken</b>

Ziraat Atıkları	310-430	60-70
Dökülmüş ağaç yaprakları	210-290	58
Algler	420-500	63
Atık su çamuru	<b>310-800</b>	<b>65-80</b>

### 2.3 Tarımsal Atıklarla İlgili Yapılan Çalışmalar

Tarımsal atık fraksiyonlarında büyük, kullanılmayan bir enerji potansiyeli vardır. Parawira ve diğ. (2008) bir pilot ölçekli çalışmada, katı patates atığı ve şeker pancarı yapraklarının hem ayrı ayrı hem de birlikte çürütülmesinde stabilizasyonu ve biyometanasyonu için basit iki aşamalı anaerobik çürütme işleminin etkinliği araştırmışlardır. Asidojenik reaktörlerde yüksek karbondioksit üretimi, yüksek uçucu yağ asidi konsantrasyonu ve düşük pH ile gösterildiği gibi, hidroliz-asitleştirme ve metanojenez arasında iyi bir faz ayrımı elde edilmiştir. Bireysel substratların çürütülmesi, metan formunda 2,1–3,4 kWh/kgVS'lik brüt enerji verimi vermiştir. Bununla beraber birlikte çürütme, %60'a kadar daha yüksek metan verimi sağlamıştır ve metan üretiminin iyileştiğini göstermektedir. Çalışma süresi boyunca metan filtrelerinin bütünlüğü korunarak %60-78 metan içeriğine sahip biyogaz üretilmiştir. Bu pilot ölçekli çalışmanın sonuçları, iki aşamalı anaerobik çürütme sisteminin, patates atığı ve şeker pancarı yaprakları gibi yarı katı tarımsal artıkların etkin bir şekilde dönüştürülmesi için uygun olduğunu göstermiştir.

Brown ve diğ. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, lignoselülozik biyokütle hammaddeleri (şalt otu, mısır somağı, buğday samanı, bahçe atıkları, yapraklar, atık kâğıt, akçaağaç ve çam), sıvı anaerobik çürüme ve katı hal anaerobik çürüme altında metan üretimi için değerlendirilmiştir. Atık kâğıt ve çam dışında sıvı anaerobik çürüme ve katı hal anaerobik çürüme arasında metan veriminde önemli bir fark bulunmamıştır. Bununla birlikte, kâğıt hariç, sıvı anaerobik çürüme sistemine kıyasla katı hal anaerobik çürüme sisteminde hacimsel üretkenlik 2 ila 7 kat daha fazladır. Mısır somağı, buğday samanı ve şalt otundan elde edilen metan verimi, bahçe atığı, akçaağaç ve çam biyokütlesinden 2-5 kat daha yüksektir. Atık kâğıt, aşırı organik yükleme nedeniyle katı hal anaerobik çürütme sırasında asitleşmenin neden olduğu yalnızca 15 L/kgVS'lik bir metan verimine sahiptir. Çam ayrıca 17 L/kg

VS'lik çok düşük biyogaz verimine sahiptir, bu da katı hal anaerobik çürütmede önce ön arıtmaya ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın bulguları, lignoselülozik biyokütlenin katı hal anaerobik çürütülmesinin etkinliğini ve kararlılığını geliştirmek için gelecekteki çalışmalara rehberlik edebilmektedir.

Lizasoain ve diğ. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, buharla ön işleme tabi tutulan kamışın spesifik metan verimini ve ön arıtma koşullarının fiziko-kimyasal özelliklerini nasıl etkilediğini tespit etmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, kamış 2,47 ile 4,83 arasında değişen şiddet faktörlerinde buhar patlaması ile ön işleme tabi tutulmuştur. Metan verimi üzerindeki etkiler, toplu deneylerde analiz edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri yakalanmış ve substratların detaylı kimyasal analizleri yapılmıştır. Ön muamele şiddetinin artmasının biyokütlenin daha fazla kırılmasına ve defibrilasyonuna yol açtığını göstermiştir. Sonuçlar, kamış biyokütlesinin giderilebilirliğinin ön arıtmadan sonra kayda değer şekilde arttığını göstermektedir. İşlem görmemiş numuneyle karşılaştırıldığında, buhar patlaması, 15 dakika boyunca 200°C'de ön işlemden sonra spesifik metan verimini %89'a çıkarmıştır.

Phuttaro ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, lignoselülozik biyokütleyle sahip olan Napier otunun hidrotermal ön işleminin metan verimi üzerindeki etkileri yatay akışlı reaktörlerde incelenmiştir. Hidrotermal ön işlem sıcaklığı, Napier otunun parçalanabilmesini ve metan verimini önemli ölçüde etkilemiştir. Ön işleme tabi tutulmamış biyokütle ile karşılaştırıldığında, 175°C'de hidrotermal olarak ön işleme tabi tutulan biyokütle, yapılan testler sonucunda yaklaşık olarak %35 daha yüksek metan verimi ile sonuçlanmıştır. Napier otunun 200°C'de hidrotermal olarak ön işleme tabi tutulmuş biyokütlenin anaerobik çürüebilmesi için test edilen her iki aşırı da inhibe eden, özellikle hidroksimetilfurfural ve furfural olmak üzere önemli miktarda biyokütle bozunma ürünlerinin oluşumunu indüklemiştir. Yarı-sürekli reaktörlerde anaerobik çürüme işleminde, hidrotermal olarak ön işleme tabi tutulmuş bulamaçta bulunan önemli miktarda çözünür organik, çürütücünün hızlı asitlenmesine neden olmuştur.

Pirinç samanı, metan üretimi için yüksek potansiyele sahip, yaygın olarak bulunan bir lignoselülozik atıktır. Bununla birlikte, pirinç samanının yüksek C/N oranı, tek başına çürüme için zayıf proses stabilitesine neden olur. Kainthola ve diğ.

(2019) tarafından yapılan çalışmada, biyokütle bozunmasını arttırmak için farklı C/N oranlarında pirinç samanı ve hidrilla verticillata'nın (azot bakımından zengin ortak substrat) kesikli reaktörlerde birlikte çürümesi araştırılmıştır. Farklı C/N oranları, tek başına çürümeye (kontrol reaktörü) göre belirgin şekilde geliştirilmiş işlem kararlılığı ve daha yüksek hacimsel metan verimi ortaya çıkarmıştır. C/N oranının 25 olduğu birlikte çürüme reaktörü, kontrol reaktörüne göre %40'lık bir artışla en yüksek metan üretkenliğini göstermiştir. C/N oranının 15 olduğu reaktörde, amonyak inhibisyonu nedeniyle en düşük metan verimini elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, uygun C/N oranının mikrobiyal yolu güçlendirerek metan oluşumunu arttırdığını göstermiştir.

Yüksek katı maddeli anaerobik birlikte çürüme, enerjiyi geri kazanma ve kentsel katı atık ve atık aktif çamurun organik fraksiyonunun çevresel etkilerini azaltma potansiyeline sahiptir. Lee ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, substrat / aşı (S/I) oranlarının, alkalilik kaynaklarının (sodyum bikarbonat ve istiridye kabukları), ortak substrat karışım oranlarının ve aşılamanın gıda atığı, bahçe atığı ve atık aktif çamurun yüksek katı maddeli anaerobik birlikte çürüme üzerindeki etkisini kesikli reaktör kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalar uzun vadeli yüksek katı maddeli anaerobik birlikte çürüme performansı, sızıntı suyu geri devri ile yarı-sürekli bir biyolojik çürütücü çalışması yoluyla optimal koşullar altında değerlendirilmiştir. Alkalinite kaynağı olarak ezilmiş istiridye kabukları ve sodyum bikarbonat karışımı kullanan S/I=1 olan çürütücü en yüksek metan verimine (183 ml CH<sub>4</sub>/g VS) sahiptir. Atık aktif çamurun (WAS) gıda atıklarına (FW) ve bahçe atıklarına (YW) eklenmesi, başlangıç döneminde asitlenmeyi (pH 6,86±0,12) azaltmış ve bu da çürütücü stabilitesini iyileştirmiştir. FW/YW/WAS=0.8:1.7:0.5 olan karışımlar, FW/YW/WAS=1:1:1 olan karışımlardan daha yüksek metan verimine (134±15 mlCH<sub>4</sub>/gVS) sahiptir, ancak uçucu yağ asidi inhibisyonun iyileşmesi daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Ortama alıştırılmış aşı kullanımı, başlangıç sırasında gecikme süresini ortadan kaldırmıştır ve %38 daha yüksek metan verimi üretmiştir. Yarı sürekli biyo-çürütücüde, ortalama %38'lik bir uçucu katı azalması ve 186 ml/gVS'lik metan verimi elde edilmiştir. Kesikli reaktörlere kıyasla yarı-sürekli biyo-çürütücü de iyileştirilmiş performans, alt tabakaların mikrobiyal topluluğa kütle transferini iyileştirebilen sızıntı suyu geri devrinden kaynaklanmaktadır. Atık organiklerin yüksek katı maddeli anaerobik birlikte çürümesinden üretilen digestat, ticari olarak

temin edilebilen biyoorganik gübreye göre 1,7-2,3 kat daha yüksek nitrojen, benzer fosfor ve 0,2-0,3 kat daha düşük potasyum içeriğine sahiptir.

Dos Santos Filho ve diğ. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, biyokütleden temiz enerji üretmek amacıyla, tarımsal ve hayvancılık kalıntılarının evsel kanalizasyon çamuru ile kombinasyonundan biyometan üretimi için anaerobik yatay bir reaktör tasarlanmıştır. Geleneksel reaktörlerden farklı olarak, yatay reaktör, metan yakalamayı kolaylaştırmak için dikdörtgen kanatlı bir radyal karıştırıcı ve bir gaz odası ile tasarlanmıştır. Reaktör başlangıçta sadece 5:4:1 oranında 7,5 kg evsel arıtma çamuru (DSS), 6 kg sığır rumen sıvısı (BRF) ve 1,5 kg keçi gübresinden (GM) oluşan substrat ile doldurulmuştur. Sistem bu şekilde 120 gün boyunca işletilmiş ve anaerobik yatay reaktörde 254,35 NL biyogaz üretilmiştir. 120 günlük biyolojik çürümeden sonra, meyve ve sebze atıkları reaktöre ilave edilmiştir. Meyve ve sebze atıklarının reaktöre yüklenmesinden önce substratın pH değeri 8,5'tir. Eklenen meyve ve sebze atıklarının pH'ı 4,8'dir. Çürüme işlemi sırasında organik maddenin dönüşümü nedeniyle pH 8,5 ila 7,55 arasında değişmiştir ve pH, 30 günlük bir hidrolik alıkonma süresi ile 5,70'e düşmüştür. Reaktör içeriği, deney sonunda pH 7,60'ta kimyasal madde kullanılmadan alkalize edilmiştir. Meyve ve sebze atıklarının yatay reaktörde birlikte çürümesi sonucunda 711,20 NL biyogaz birikmiş ve net üretimine ulaşmıştır.

Cucina ve diğ. (2021) yapmış oldukları çalışmadaki amaçları, lignoselülozik kalıntıların anaerobik birlikte çürümesi sırasında çözünür organik maddenin rolünü değerlendirmektir. Karabuğday öğütme kalıntısı (karabuğday kabuğu), birlikte çürümenin biyometan verimi, proses stabilitesi ve bunların çözünür organik madde ile ilişkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için farklı organik atıklarla birlikte çürütülmüştür. Sonuçlar, birlikte çürümenin karabuğday kabuğunun biyometan verimini arttırdığını ve en iyi sonucun mezbaha atıklarıyla birlikte çürümesinden elde edildiğini göstermiştir. Kinetik analiz, meyve atıklarının ve bira fabrikası atıklarının, lignoselülozik kalıntıların anaerobik çürümesinde olumlu yönde etkilediğini, biyometan potansiyelini artırdığını ve gecikme fazı süresini azalttığını göstermiştir. Birlikte çürüme deneyleri sırasında çözünür organik madde ile biyometan verimleri arasında pozitif bir korelasyon bulunmuştur. Bununla birlikte, meyve atıklarıyla birlikte çürümenin, şekerlerin uçucu yağ asitlerine hızlı bir şekilde dönüştürülmesine

neden olduğu, anaerobik çürümenin erken evresindeki (pH 5,7) aşırı asitleşmeden etkilendiği belirlenmiştir.

Karki ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, kahve küspesi (CP), sığır gübresi (CM), gıda atığı (FW) ve suyu alınmış kanalizasyon çamurunun (DSS) anaerobik tek başına ve birlikte çürümesi, biyokimyasal metan potansiyeli testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. CP: CM ve FW: DSS için beş farklı ortak besleme stoğu oranının (1:0, 4:1, 2: 1, 4:3 ve 0:1) anaerobik olarak çürümüş sığır gübresi ve anaerobik olarak çürümüş atık aktif çamur olmak üzere iki farklı aşının etkileri ve spesifik metan verimleri de değerlendirilmiştir. Hem CP hem de FW'nin tek başına çürümesi, incelenen tüm birlikte çürüme oranlarına kıyasla en yüksek metan verimini vermiştir. Ayrıca, test edilen birlikte-çürüme oranlarının hiçbirini için sinerjistik veya antagonistik bir etki gözlemlenmemiştir. Dokuz farklı kinetik model (beş geleneksel tek başına çürüme modeli ve dört birlikte-çürütme modeli) hem tek başına hem de birlikte-çürütme çalışmaları için karşılaştırılmıştır ve değerlendirilmiştir. CP:CM için, ikinci dereceden denklem modelleriyle koni ve modifiye edilmiş Gompertz sırasıyla tek başına ve birlikte çürüme sistemleri için en uygunken, FW: DSS için birleştirilmiş model tüm sistemler için en iyi uyumu göstermiştir.

## **2.4 Katı Atık Bertaraf Yöntemleri**

Bu bölümde katı atık bertaraf yöntemlerinden tez çalışması ile ilgili olanlar detaylı açıklanırken, diğer yöntemler kısaca açıklanmıştır.

### **2.4.1 Yakma**

Yakma, katı ve sıvı atıkların yakma tesisi adı verilen kontrollü ortamda yakılmasını içerir. Endüstriyel atık, kanalizasyon çamuru, kentsel katı atığı, tehlikeli atık ve klinik atıkları yakmaya uygun atıklar olarak gruplandırılabilir. Bu teknik, atıkların kontrollü bir sistemde doğrudan yakılmasını ve 700 ila 1000 °C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda oksijenin varlığını içeren bir süreç olarak da tanımlanabilir (Guendehou ve diğ. 2006). İşlem gazları, inert külleri ve enerjiyi ısı

şeklinde serbest bırakır. Karbondioksit ve su buharı, kentsel katı atıkların yakılması yoluyla yayılan başlıca bileşiklerdir (Johnke 2012).

Yakma, kentsel katı atıkların ve tehlikeli katı atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi için önemli bir yöntemdir (Arafat ve diğ. 2015). Katı atıkların enerji içeriğini geri kazanmak için atık yakma yaygın olarak kullanılmaktadır (Grosso ve diğ. 2010). Atık yakma işlemi sırasında katı atıklar yakılarak kalıntılara dönüştürülür ve aynı anda gaz halinde ürünler ve enerji üretilir. Yakma, katı atık hacmini %90 ve ağırlığını %70'e kadar azaltır (Liu ve Rajagopal 2019).

Katı atıkların yakılmasındaki temel sorun toksik kirleticilerin emisyonudur, ancak enerji geri kazanım yönü de büyük önem taşımaktadır (Damgaard ve diğ. 2010). Yakma işlemi sonucunda kül oluşur ve ağır metaller, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ve kalıcı organik kirleticiler gibi partikül ve gaz kirleticileri serbest bırakır (Tyagi ve diğ. 2018).

#### **2.4.2 Piroliz**

Piroliz, oksijen yokluğunda atıkların termal bozunmasını içeren bir süreçtir. İşlem, yanıcı gazlar olarak da bilinen yağ / mum, kömür ve gazlı ürünler gibi geri dönüştürülebilir ürünlerin üretimine yol açar (Czajczyńska ve diğ. 2017).

Piroliz, karbonlu hammaddenin oksijen yokluğunda bozunarak kalıcı uçucu maddeler (gaz), yoğunlaşabilir hidrokarbonlar (katran) ve genellikle katı bir kalıntı oluşturan (char, biochar, odun kömürü) termokimyasal bir işlemdir (Sosa Sabogal ve diğ. 2021).

Atık işleme prosesi olarak bu teknik, kentsel katı atıkları yakıt ve metaller, kömür vb. gibi tek kullanımlık güvenli maddelere dönüştürebilir. İşlem ayrıca katı kömür, gaz veya sıvı / petrol ürünleri üretmek için en uygun şekilde koşullandırılabilir. Proses ayrıca, atıktan enerji dönüştürücüsü olarak işlev gören piroliz reaktörü olarak bilinen bir sistemi de içerir (Chen ve diğ. 2014). Piroliz genellikle, biyo-yağ, biyokömür ve sentez gazı gibi enerji ürünleri üretmek için oksijen yokluğunda (veya sınırlı seviyede) atık malzemelerin termal olarak

bozunabileceği bir işlemdir (Hasan ve diğ. 2021). Piroliz işleminin yan ürünleri olarak gazlar ve kömür üretilir (Rehrah ve diğ. 2016).

Piroliz, sıcaklık veya ısıtma hızı gibi bazı çalışma parametrelerini değiştirerek katı, sıvı ve gaz halindeki ürünlerin kombinasyonunu üretebilir. Ek olarak, düşük enerji yoğunluklu malzemeleri yüksek enerji yoğunluklu biyo-yakıtlara dönüştürmek için de kullanılır ve böylece daha yüksek değerli kimyasalların geri kazanılmasına yardımcı olur (Czajczyńska ve diğ. 2017).

### **2.4.3 Kompostlaştırma**

Kompostlaştırma, kararlı, humus benzeri bir son ürün oluşturmak için organik maddenin kontrollü aerobik koşullar altında biyolojik olarak parçalanması olarak tanımlanır (Jara-Samaniego ve diğ. 2017). Bu işlem sonrasında ortaya çıkan ürün kompost olarak adlandırılmaktadır.

Kompostlama, çeşitli mikroorganizma ve nematod gruplarının kritik roller oynadığı biyokimyasal bir süreçtir. Spesifik olarak, bir katı hal fermantasyon işlemidir ve esas olarak aerobik termofiller tarafından gerçekleştirilir (Pietronave ve diğ. 2004). Kompostlama, organik maddeyi parçalayan ve stabilize eden biyolojik bir süreçtir. Biyolojik olarak üretilen ısının bir sonucu olarak termofilik sıcaklıkların oluşmasını sağlayan koşullarda gerçekleşir, bu da biyolojik olarak parçalanabilen, patojen ve tohum içermeyen bir son ürünle sonuçlanır ve arazide toprak şartlandırıcı olarak kullanılabilir (Jain ve diğ. 2018).

Geleneksel olarak kompostlama, tarımsal atıkların hacmini ve su içeriğini azaltmak, patojenleri yok etmek ve toprakların doğal bir zenginleştirilmesi olarak kullanılmak üzere kokusuz, besin ve humus açısından zengin bir ürün üretmek için kullanılmıştır (Graça ve diğ. 2021).

Kompostlama genel olarak açık ve kapalı sistemler olarak ikiye ayrılmakla birlikte işletme şartları, kullanılan makine ve ekipmanlara göre de kendi içinde ayrılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan temel 5 sistem bulunmaktadır. Bunlar;

1. Pasif ya da açık yığında kompostlaştırma,

2. Çevirmek, karıştırmak ve işlemek için yükleyici iş makinaları kullanarak yapılan aktarmalı yığın kompostlaştırma,

3. Özel aktarma makinaları kullanarak yapılan aktarmalı yığında kompostlaştırma,

4. Delikli borular kullanarak yapılan havalandırılmalı statik yığında kompostlaştırma,

5. Reaktörde kompostlaştırmadır (Yıldız ve diğ. 2009).

#### **2.4.3.1 Kompostlaştırma ile ilgili Yapılan Çalışmalar**

Jara-Samaniego ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, Chimborazo Bölgesi'nde (Ekvador) üretilen kentsel katı atıkların sürdürülebilir yönetimi ve geri dönüşümü için bir arıtma yöntemi olarak kompostlamayı ve elde edilen bazı kompostların fide üretimi için yetiştirme ortamı olarak kullanımını incelenmektedir. Bunun için, kentsel katı atıklar kullanılarak altı yığın hazırlanmıştır: 1, 2 ve 3 numaralı yığınlar, Riobamba depolama sahasından gelen kentsel katı atıkları kullanılarak hazırlanmıştır ve 4, 5 ve 6 numaralı yığınlar, kaynakla ayrılmış pazar atıkları ve kentsel park-bahçe kullanılarak hazırlanmıştır. Kompostlamadan sonra, C3, C4 ve C5 kompostları (sırasıyla 3, 4 ve 5 numaralı yığınlardan) substrat bileşenleri olarak kullanılmış, domates, kabak ve biber fide üretimi için farklı yüzdelerde (0, 25, 50 ve 75, hacim/hacim) turba ile karıştırılmıştır. Elde edilen kompostlar, fitotoksinite olmaksızın yeterli fiziko-kimyasal ve kimyasal özellikler ile uygun bir stabilite ve olgunluk derecesi göstermiştir.

Lalremruati ve Devi (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, limon kabukları, karışık sebze atıkları ve pişmiş yemek atıklarının kompostlaştırılması gerçekleştirilmiş ve bahçe toprağı ile iyileştirilmiştir. Tüm kompost karışımlarında, 42 ila 49 °C aralığında termofilik faza 21. günde ulaşılmıştır. Pişmiş yemek atığı karışımındaki sıcaklık 90 gün sonunda ortam sıcaklığına düşmezken limon kabuğı ve karışık sebze atıkları ortam sıcaklığına düşmüştür. Organik karbon, toplam azot, mevcut fosfor ve potasyum, limon kabuğı ve karışık sebze atığı kompostlamasında

başlangıçtan son aşamaya kadar azalırken, pişmiş gıda atığı kompostlaştırmasında son aşamada toplam azot artmıştır. Organik karbonun kompostlama sürecinde toplam azot, mevcut fosfor ve potasyum ile önemli korelasyonu, düşüş eğiliminin nedeni olabilmektedir. Bahçe toprağının iyileştirilmesi, daha düşük bir termofilik faza ve uzun bir kompostlama süresine yol açar. Bununla birlikte, kompostların kalitesi, bu yaygın evsel atıkların kompostlaştırılmasının evde yapılabileceğini gösteren önerilen aralıklar içindedir ve bahçe toprağı kutu yöntemiyle birlikte başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Kara asker sineği larva kompostlaması, mevcut biyolojik olarak parçalanabilen atıklara değer katabilecek umut verici bir atık işleme yöntemidir. Bununla birlikte, düşük protein içeriğine sahip ve karmaşık moleküller içeren substratlar (meyve kabukları) larvalar tarafından kolayca parçalanmaz. Isibika ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, balık atıklarıyla birlikte farklı muz ve portakal kabukları karışımlarının birlikte kompostlanmasının kara asker sineği larva kompostlama verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda muz kabuğu, portakal kabuğu ve balık atığı karışımları (toplam 50 farklı karışım) kullanılmıştır. Balık atığı içermeyen, portakal kabuğu ve muz kabuğu karışımlarıyla beslenen kara asker sineği larvası, uçucu katılar bazında daha düşük bir biyokütle dönüşüm verimliliği ( $4,5 \pm 1,3$ ) ile sonuçlanmıştır. Meyve kabuklarının balık atıklarıyla birlikte kompostlanması biyokütle dönüşüm verimliliğini arttırmış ve %25'lik en yüksek uçucu katı bazında biyokütle dönüşüm verimliliği %75 balık atığı dahil edildiğinde elde edilmiştir. Bununla birlikte, uçucu katı bazında biyokütle dönüşüm verimlilikleri değişken balık atığı bileşimi nedeniyle büyük ölçüde değişmiştir ( $18,0 \pm 5,8$ ). %25 balık atığı dahil edilmesi, balık atığının dahil edilmediği zamana kıyasla iki kattan fazla yüksek uçucu katı bazında biyokütle dönüşüm verimliliği ( $12,3 \pm 2,1$ ) ile sonuçlanmıştır. Artan balık atığı katılımıyla dönüşüm verimliliği varyansı arttığından, kara asker sineği larva kompostlama verimliliğinin güvenilirliğini artırmak için balık atığı içeriğinin toplam karışımın yaklaşık %25'inde tutulması tavsiye edilmiştir.

#### 2.4.4 Düzenli Depolama

Düzenli depolama, dünya çapında, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kentsel katı atıkların bertarafı için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Lavagnolo ve diğ. 2018). Düzenli depolama, katı atıkların işlenmesi ve bertaraf edilmesinin başlıca ve ekonomik yoludur (Munawar ve diğ. 2018).

Atıkların kontrollü olarak kabul edildiği, depolama yapıldıktan sonra atıkta meydana gelen reaksiyonlar sonucunda oluşan atıkların da kontrol edildiği alanlardır. 2010 yılında yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliğine göre; düzenli depolama tesisi “Atıkların oluştuğu tesis içinde geri kazanım, ön işlem veya bertarafa gönderilmek üzere geçici depolandığı birimler, atığın geri kazanım veya ön işleme tabi tutulmak amacıyla üç yıldan daha kısa süreli ara depolandığı tesisler ile atığın bertaraf işlemine tabi tutulmak üzere bir yılı geçmeyecek şekilde ara depolandığı tesisler hariç olmak üzere atıkların yeraltı veya yer üstünde belirli teknik standartlara göre bertaraf edildiği sahaları” olarak tanımlanmaktadır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı 2010).

Atıkların düzenli depolanmasındaki hedef; kimyasal, biyolojik ve mekanik yöntemlerle yeniden kullanılabilir hale getirerek ekonomik olarak mümkün olmayan veya bu işlemler neticesinde ortaya çıkan ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek, diğer canlılara zarar verebilecek ve bunun yanında çevreyi görsel açıdan bozan atıkların yerleşim yerlerinden uzaklaştırılıp tüm bu olumsuzlukları ortadan kaldırmaktır (Yılmaz ve Bozkurt 2010).

Diğer depolama yöntemlerine göre düzenli depolama alanlarının en belirgin avantajı ekonomik ve ilk yatırım maliyetinin düşük olmasıdır. Nihai bertaraf yöntemidir ve tüm atıklar için uygun bir depolama yöntemidir. Düzenli depolama alanlarına depolanan katı atıklara sıkıştırılma işlemi gerçekleştirildiği için vahşi depolama alanlarına göre daha az alana ihtiyaç duyulmaktadır. Depolama alanları kapatıldıktan sonra park-bahçe amacıyla da kullanılabilir (Tuncel 2006). Kalabalık yerleşim yerleri için ekonomik taşıma mesafesi için bir alan bulmak en önemli dezavantajdır. Diğer dezavantajları ise kapatılmış depolama alanlarının sürekli olarak bakımı gereklidir. Depo alanındaki gaz ve sıvılar denetimi iyi yapılması gerekmektedir. Aksi halde çevre kirliliğine yol açabilir ve depo gazının

birikmesiyle patlamalar meydana gelebilir, çevreye kötü koku salınımı olabilir, sızıntı suyunun toprağa sızmasıyla yeraltı sularında kirlilik meydana gelebilir ve buna bağlı olarak alıcı ortamlara kirlilik taşınabilir (Acun 2014).

#### 2.4.5 Biyoreaktör Depolama Sistemleri

Biyoreaktör depolama sistemleri, 5-8 yıl gibi kısa sürede kolaylıkla veya kısmen ayrıştırılabilir organik atık bileşiklerini biyogaza dönüştürmek ve dengelemek için gelişmiş mikrobiyal süreçleri kontrollü kullanan depolama sistemleridir (Warith 2002). Biyoreaktör depolama alanları yağmur suyu ve kar erimesiyle oluşan suyun atık içine sızmasını kontrollü koşullar altında genellikle maksimuma çıkarmak için tasarlanır. Bu depolama alanlarının tasarım hedefleri, sızıntı suyunun yeraltına sızmasını en aza indirmek ve kontrollü durumlar altında depo gazı oluşum oranlarını en üst seviyeye çıkarmaktır (Bilgili ve diğ. 2007). Biyoreaktör depolama alanlarının, sızıntı suyu geri devri yapılarak biyolojik bozunma oranını ve depo gazı üretimini arttırdığı bilinmektedir (Chakma ve Mathur 2017). Biyoreaktör depolama alanları ile ilişkili sızıntı suyu geri devri uygulaması sızıntı suyu arıtma ve yönetimi için çözüm sağlar (Srivastava ve Chakma 2021). Biyoreaktör işletimi sırasında sürekli sızıntı suyu geri devri, aşırı sızıntı suyu salınımı ve göllenme nedeniyle stabilizasyonu geciktirebilir (Manzur ve diğ. 2016). Biyoreaktör depolama sistemlerinde aşırı sızıntı suyu üretimi aynı zamanda tercihli süzülme yolları oluşturarak katı atıkların düzensiz ve gecikmeli bozulmasına yol açabilir (Xu ve diğ. 2020). Sık sızıntı suyu geri devrinin neden olduğu aşırı nem içeriği, anaerobik çürütme işlemi sırasında hidroliz ve asidojenez oranlarını yavaşlatarak bozunma sürecini de engelleyebilir (Veluchamy ve Kalamdhad 2017).

Atığın biyolojik bozunmasını arttırmak için kullanılan teknikler sızıntı suyu geri devri, geri devir hacmi, atık parçalama, atık sıkıştırma, nem içeriği ve sıcaklık kontrolü, pH ayarlaması, havalandırma, çamur ilavesi ve besin ilavesidir (Reinhart ve diğ. 2002).

Son yıllarda, biyoreaktör depolama teknolojisinin su ilavesi, sızıntı suyu geri devri veya hava enjeksiyonu yoluyla biyolojik olarak parçalanabilen organik atıkların

ayrışmasını ve stabilizasyonunu desteklediği gösterilmiştir (Mali Sandip ve diğ. 2012).

Biyoreaktör depolama sahalarının ilk yatırım, işletme, bakım ve onarım masrafları bulunmaktadır. Biyoreaktör depolama sistemleri daha karmaşık ekipmanlar içerdiği için ilk yatırım maliyeti yüksektir. İşletme esnasındaki bakım ve onarım masrafları da fazladır. Bu deponilerde genellikle tıkanma ve pompa arızaları gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. Ancak biyoreaktörlerden elde edilen hacim kazanımı, gaz miktarının artması ve arıtma masraflarındaki azalma yüksek maliyetleri karşılamaktadır.

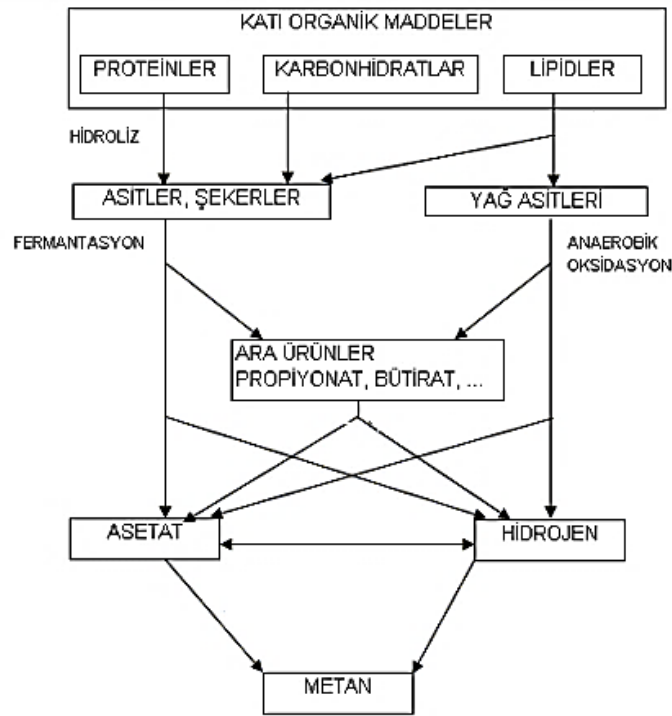
Biyoreaktör depolama alanlarının avantajları şu şekilde sıralanabilir (Warith 2002);

- Katı atıkların daha kısa sürede ayrışması ve biyolojik stabilizasyonu
- Aerobik ve anaerobik durumların ikisinde de daha düşük atık toksisitesi
- Depo gazı üretim oranlarında artma ve önemli derecede artan depo gazının enerji için kullanılabilmesi
- Sızıntı suyunun arıtımının ve işletme maliyetinin azaltılması
- Atık yoğunluğunun artmasından dolayı depo alanındaki boşluktan %15-30 kazanç
- Depo alanının kapatılmasından sonraki bakımın azaltılması ve depolama maliyetinin düşürülmesidir.

Biyoreaktör depolama alanları farklı işletme şartları altında işletilebilmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar doğrultusunda 4 tip biyoreaktör deponi türü geliştirilmiştir. Bunlar; anaerobik, aerobik, fakültatif ve hibrit biyoreaktör şeklindedir (Long ve diğ. 2009).

### 2.4.5.1 Katı Atıkların Anaerobik Parçalanması

Anaerobik çürütme, organik maddelerin oksijen varlığının olmadığı ortamlarda ayrışması sırasında gerçekleşen çok adımlı biyokimyasal reaksiyonlardan oluşan biyolojik bir prosestir. Bu prosesin ilk adımında polisakkarit, karbonhidrat, protein, lipid gibi polimerik yapıdaki kompleks organik maddeler hücre dışı enzimler tarafından daha küçük boyutta ve hücre zarından geçebilecek şekildeki çözünebilir ürünlere dönüştürülmektedir. Nispeten basit ve çözünebilir yapıdaki bu bileşikler fermantasyon veya anaerobik oksidasyonla kısa zincirli yağ asitleri, alkoller, karbondioksit, hidrojen ve amonyağa dönüştürülmektedir. Asetat dışındaki kısa zincirli yağ asitleri ise asetate, hidrojen ve karbondioksite dönüştürülmektedir. Prosesin son safhasında asetatin parçalanması veya  $H_2$  ile  $CO_2$ 'nin sentezi yoluyla  $CH_4$  üretimi gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.3'te anaerobik arıtmanın aşamaları gösterilmektedir (Speece, 1996).



Şekil 2.3: Anaerobik arıtmanın adımları

Hidroliz aşaması anaerobik ayrışma için çoğu zaman hız sınırlayıcı bir basamak değildir, fakat çok yavaş hidroliz olan organik maddelerin stabilize edildiği anaerobik çürütme işlemlerinde hız sınırlayıcı aşama olabilmektedir (Rittmann ve McCarty 2001). Lignoselülozik biyokütlenin anaerobik çürütmesi sırasında,

mikroplar tarafından üretilen hidrolitik enzimler tarafından lignoselülozun hidrolizi, hız sınırlayıcı adım olarak kabul edilmiştir (Yu ve Schanbacher 2010).

De Laelos ve diğ. (1997) tarafından yapılan bir çalışmada, Tilburg'daki (Hollanda) Valorga tam ölçekli tesisi, ayrı olarak toplanan yılda 52.000-ton organik kentsel katı atığını işlemek üzere tasarlanmıştır. Valorga parçalama işlemi, yarı-sürekli, yüksek katı içerikli, tek kademeli, piston akımlı bir işlemdir. Sistemin ana özelliği, reaktörlerin içinde herhangi bir mekanik ekipmanın tamamen bulunmamasıdır. Arıtılacak atıklar yemek ve bahçe atıklarından oluşmaktadır. Atık akışının karakterizasyonu, mevsimsel bahçe atığı üretimi ile ilişkili olan miktar ve kalitede mevsimsel bir dalgalanma ortaya çıkarmıştır. Metan verimi, mg uçucu katı madde başına 210 ila 290 m<sup>3</sup> arasında değişmektedir ve atık bileşimi ile ilgilidir. Durgun kış döneminde atık, nispeten lignoselülozik bahçe atıklarından daha fazla biyolojik olarak parçalanabilen gıda atığı içerir. Biyolojik süreç, atık sudaki uçucu asitlik, alkalilik ve amonyak ölçümlerine dayalı olarak stabildir. Susuzlaştırma ve aerobik koşullar altında depolamadan sonra organik kalıntı, toprak düzenleyici olarak kabul edilebilir.

Zhao ve diğ. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, yaklaşık 32.400 metrik ton kentsel katı atığı içeren 0,49 hektarlık bir biyoreaktör depolama hücresi, Harrison, Michigan, ABD'deki Northern Oaks Geri Dönüşüm ve Bertaraf Tesisi'nde inşa edilmiş ve işletilmiştir. Bu tam ölçekli araştırma hücresinin tasarımı, sürekli sıcaklık ve nem verileri ile üretilen sızıntı suyu ve gazın hem miktarı hem de bileşiminin periyodik ölçümlerini sağlayan 48 adet sıcaklık ve nem sensörü, sızıntı suyu toplama havzaları ve gaz örnekleme portlarından oluşan bir ağ içermektedir. Veriler, metan üretiminin yaz aylarında yerleştirilen hücrelerin doldurulmasından yaklaşık 3 ay sonra başladığını, ancak kışın doldurulanların 8 aya kadar metan üretimi olmadığını göstermiştir. Sıcaklık verileri, kış aylarında doldurulan hücrelerde 6 aydan fazla -0°C'ye yakın sıcaklıkların devam ettiğini ve bu dönemde gaz üretiminin minimum olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, atık kütlesi içinde optimum nem seviyelerini korumaya ek olarak, soğuk iklimlerde sıcaklık kontrolünün önemli bir tasarım düşüncesi olması gerektiğini göstermektedir.

Di Maria ve Micale (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, tam ölçekli bir hibrit biyoreaktör depolama sahasından üretilebilen depo gazı miktarının analizi

araştırılmıştır. Düzenli depolama biyo-hücrelerinde bertaraf edilen atık, kentsel katı atıklarının mekanik ön işleme tabi tutulmasından kaynaklanan atık organik fraksiyondan oluşmaktadır. Atık organik fraksiyonun ortalama nemi, ıslak bazda ağırlıkça yaklaşık %40 iken, uçucu katılar, toplam katılar üzerinde ağırlıkça yaklaşık %50'dir. Ortalama toplam organik karbon konsantrasyonu, toplam katıların ağırlığına göre yaklaşık %20'dir. Atık organik fraksiyonun depo gazı üretim potansiyeli, standartlaştırılmış bir anaerobik testle araştırıldığında, yaklaşık 180 NL/kgVS'lik bir ortalama değer gösterir. İki tam ölçekli hibrit biyoreaktör depolama hücresinde yapılan çalışmanın sonuçları yaklaşık 12 hafta içinde üretilen gazın, hacimce yaklaşık %20'den hızla yükselen bir metan konsantrasyonu gösterdiğini göstermektedir. Hacime göre %55-60'a kadar enerji geri kazanımı için yaklaşık 4 aylık toplama işleminde, üretilen depo gazı miktarı, diğer geleneksel depolama sahaları için tespit edilenden önemli ölçüde daha yüksek yaklaşık 36 Nm<sup>3</sup>/ton olarak sonuçlanmıştır.

Kentsel katı atıkları arıtan kuru anaerobik çürütme tesislerinin ana sorunlarından biri, katıların (inertlerin) çürütücünün dibine çökertilmesi veya üst kısmında yüzen malzemelerin birikmesiyle faydalı hacim kaybıdır. Bu, çürütücülerin periyodik olarak boşaltılması ve temizlenmesi maliyetini, biyogaz üretiminde azalmayı ve bakımda komplikasyonları beraberinde getirir. Genellikle tortulaşma, organik maddeye ek olarak, çürütücüleri tıkayan yüksek yoğunluklu parçacıkları sürükleyen atıkların heterojenliğinin bir sonucudur. Álvarez ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, bu tıkanıklığı azaltmak için URBASER, yeni bir VALORGA reaktör konfigürasyonu tasarlamıştır. Yani VALORGA merkez duvarı kaldırılmış ve eğimli bir taban eklenmiştir. Her iki konfigürasyonun (mevcut ve yeni tasarım) çökebilirliğini ve genel performansını test etmek için bir pilot çürütücüde (95 m<sup>3</sup> kapasiteli çürütücü) hidrodinamik testler yapılmıştır. Reaktörün sıvı fazını ve katı fazını simüle etmek için sırasıyla radyo frekansı tanımlama okuyucu ile lityum izleyiciler ve farklı yoğunluktaki etiketler kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, pilot düzeyde yeni reaktör tasarımının performansında bir gelişme olduğunu göstermiştir.

Nwaokorie ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı nem arttırma stratejilerinin tam ölçekli bir katı atık depolama sahasında depolama gazı üretimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Nem arttırma stratejileri, yerinde atık

ayrışmasını desteklemek için uygulanan sızıntı suyu geri devri ve sıvı atık ilavesini içermektedir. Depolama sahasında bertaraf edilen atık kütlesi ve gaz toplama sisteminde ölçülen gaz akış hızları, depolama sahasının farklı nem artırma stratejileri ile çalıştırılan dört aşaması arasında paylaştırılmıştır. Gaz toplama sistemi, gaz kuyularındaki ve ayrıca sızıntı suyu temizleme borularındaki ve sızıntı suyu geri devir kanallarındaki ekstraksiyon noktalarını içermektedir. Ölçülen gaz akış hızları, birinci dereceden bozulma oranını (k) optimize etmek için U.S.EPA LandGEM ile modellenmiştir. Model simülasyonları, varsayılan bir sabit metan üretim potansiyeli ve gaz toplama verimliliği ile tamamlanmıştır. Saha çapında analiz için optimize edilmiş k, geleneksel katı atık depolama sahaları için varsayılan  $k=0,04$  1/yıl' a göre yükseltilmiş olan 0,078 1/yıl'dır. Dört faz için optimize edilmiş k değerleri 0,025 ile 0,127 1/yıl arasında değişmektedir. k ve nem arttırmayı yansıtan parametreler arasındaki ilişkiler belirlenmemiş olsa da, bu analiz çalışması, artan depo gazı üretimi ve gelişmiş katı atık ayrışması ile sonuçlanan nem artırma teknikleri hakkında rehberlik sağlayabilmektedir.

#### **2.4.5.2 Anaerobik Biyoreaktör Depolama**

Anaerobik biyoreaktör depolama sistemleri, biyoreaktörler arasında en yaygın kullanılan depolama yöntemidir (Hot 2012). Anaerobik biyoreaktör depolama alanları, en elverişli bakteri koşullarının oluşması ve depolanan atık kütlesinin homojen şekilde ıslanması için nem ilavesi vasıtası ile atıkların hızlı bir şekilde stabilize olmasını amaçlamaktadır (Campman ve Yates 2002).

Anaerobik biyoreaktör depolama sistemleri, düzenli depolama sistemlerinin geliştirilmiş olduğu bir depolama sistemidir. Düzenli depolamadan farklı olarak bu sistemlerde sızıntı suyu geri devri ile nem ilavesi sağlanmaktadır (Kumar ve diğ. 2011). Biyolojik parçalanma oksijen varlığı olmadan gerçekleşir ve bunun sonucunda depo gazı oluşmaktadır (DeAbreu 2003). Ayrıca katı atıkların düzenli depolama sistemlerinde bozunması, kısıtlı nem oranı ile sınırlıdır (Erses ve diğ. 2008). Depolanan kentsel katı atıklar yalnızca %25 yaş ağırlıktaki bir nem içeriğine sahiptir (Campman ve Yates 2002). Genel olarak anaerobik bozunmanın en elverişli hale gelmesi için nem koşullarının yaklaşık olarak %35-45 nem olması gerektiği

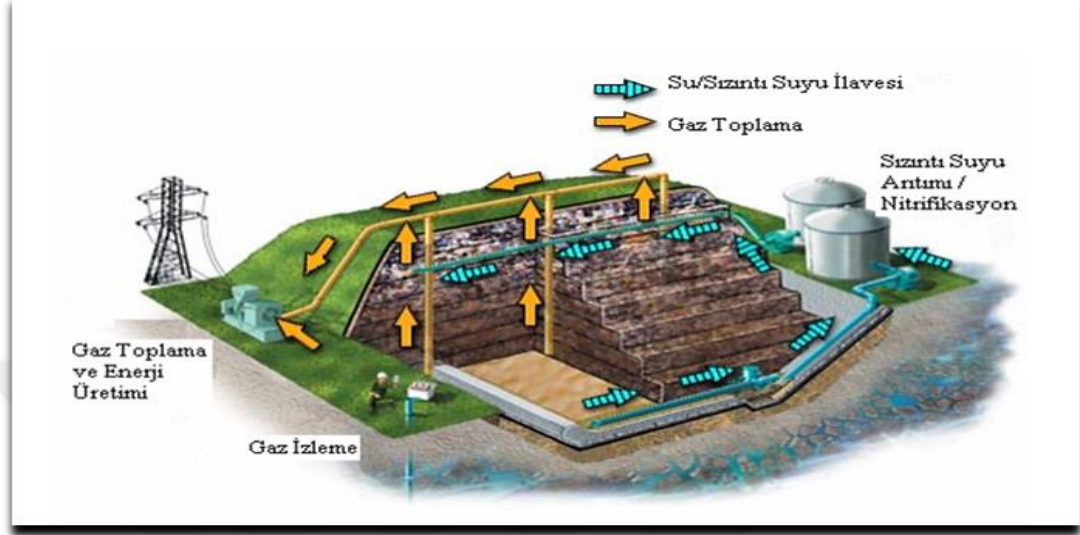
kabul edilmektedir (Warith 2003). Anaerobik biyoreaktör depolama alanlarında en uygun nem için sızıntı suyu geri devri yapılarak ortamdaki nem içeriği hemen hemen kontrol edilebilir (Harmankaya 2013). Ancak kurak bölgelerdeki depolama alanlarının çoğunda üretilen sızıntı suyu miktarı yeterli olmadığından atıkta optimum nem koşulları oluşturulamamaktadır. Dolayısıyla sızıntı suyu geri devrinin yeterli olmadığı durumlarda uygun nem koşullarını sağlamak için ortama arıtma çamuru, yağmur suyu ve diğer tehlikeli olmayan sıvı atıklar gibi nem kaynakları ilavesi gerekebilir. Atıkların nem içeriği uygun seviyelere yaklaştıkça atık bozunumun hızı artmakta ve bu da üretilen depo gazı miktarında artışa neden olmaktadır. Ayrıca atık yoğunluğunda bir artış görülmektedir (Warith 2003)

Anaerobik depolama alanları başlangıç aşamasında sıkı bir şekilde takip edilmelidir. Atıklar hızlı bir şekilde ıslanırsa, uçucu organik asitlerin birikmesi, sızıntı suyunun pH değerlerini düşürebilir, metan üreten bakteri topluluğunu inhibe edebilir ve biyolojik bozunma oranını düşürebilir. Üretilen gaz miktarı, metan konsantrasyonu, depolama alanının tabanında oluşan sızıntı suyunun pH ve depolama alanında meydana biyokimyasal reaksiyonları tanımlayan diğer ölçümler (alkalinite, uçucu yağ asitleri gibi) işletme koşullarını analiz etmek için kullanılabilir (Erses ve diğ. 2008). Bu parametreler metan popülasyonunun doğrudan göstergesidir. Metan üreten bakteriler için en elverişli koşullar 6,5 üzerindeki bir pH değeridir. Yüksek bir uçucu yağ asitleri/alkalinite oranı ( $>0,25$ ), sızıntı suyunun düşük bir tamponlama kapasitesine sahip olabileceğine ve koşulların yakında metan üretimini engelleyebileceğini gösterir (Mertoğlu 2005).

Metan ve karbondioksit birincil depo gazı olması sebebi ile sera gazı emisyonlarını minimum düzeye indirmek ve enerji projeleri için öncelikle depoda oluşan metan gazı yakalanabilir ve enerji üretimi için kullanılabilir (DeAbreu 2003).

Anaerobik biyoreaktör depolama alanlarının gaz bileşenleri, toplam depo gazı hacminin yaklaşık olarak %50'sinin metan ve karbondioksitten meydana gelmesi geleneksel depolama alanlarına benzemektedir (Hot 2012). Depo gazının metan içeriği yaklaşık %40'ı geçtiğinde, metan üreten bakteri popülasyonun oluşmuş olduğu kabul edilebilir. %40'ın altına düştüğünde ise atığın çok ıslak ya da kuru olduğunun olası bir göstergesidir. Ayrıca metan üreten bakteri popülasyonu oluştuğunda, sızıntı suyu geri devir oranı artabilir (Mertoğlu 2005). Anaerobik

depolama alanlarındaki metan konsantrasyonu genellikle %30-70'tir. CO<sub>2</sub> konsantrasyonu ise %20-50 arasında değişmektedir (Sang ve diğ. 2012). Katı atıkların depolandığı anaerobik biyoreaktör sahasının tasarım ve işletim özellikleri Şekil 2.4'de verilmiştir (Warith 2003).



Şekil 2.4: Anaerobik biyoreaktör tasarımı

Anaerobik biyoreaktör depolama alanlarının faydaları (Campman ve Yates 2002),

- Atık kütlesi içinde sızıntı suyu depolama
- Depolama alanlarında çökme oranının artırılması
- Geleneksel depolama sahalarından daha hızlı atık stabilizasyonu
- Metan üretim oranının artması (Tipik olarak %200-250 oranında artış)
- Kapatma sonrası daha düşük maliyettir.

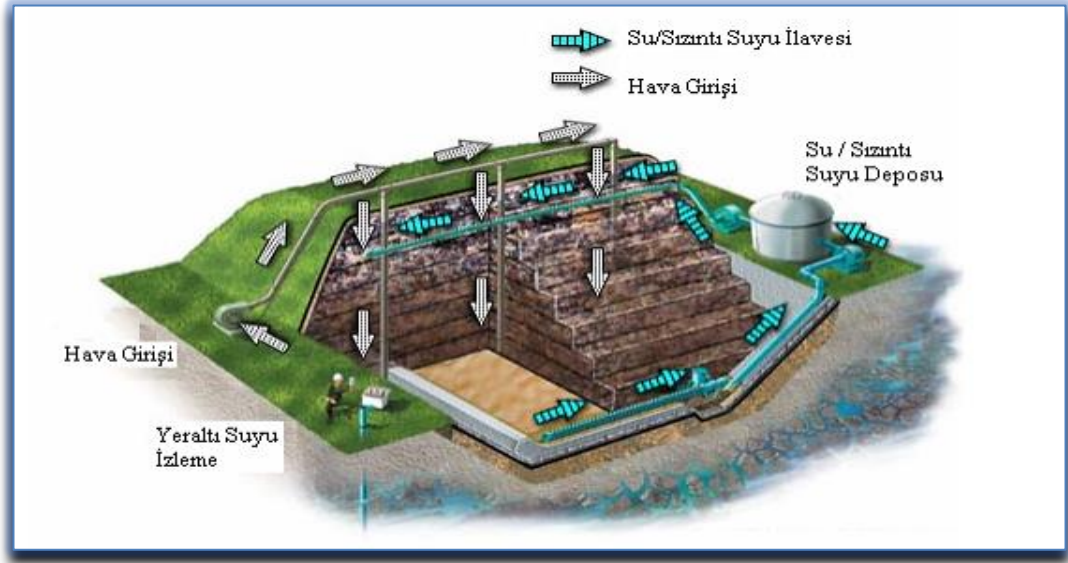
### 2.4.5.3 Katı Atıkların Aerobik Parçalanması

Aerobik parçalanma, organik materyalleri tüketen ve mineralleri serbest bırakan çeşitli heterotrofik organizma gruplarının aracılık ettiği mikrobiyal bir biyopresestir. Aerobik mineralizasyon olarak da bilinen aerobik çürüme iki aşamada gerçekleşir; amonifikasyon ve ardından nitrifikasyondur. Başlangıçta heterotrofik

mikroorganizmalar organik azotu amonyuma ( $\text{NH}_4^+$ ) dönüşür. Daha sonra nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) oksitlenir ve nihayetinde elektron alıcısı olarak moleküler oksijeni ( $\text{O}_2$ ) kullanan amonyak oksitleyici mikroorganizmalar (nitrifikasyon bakterileri ve arkeler) tarafından nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) dönüştürülür (Uludağ-Demirer ve diğ. 2008). Nitrat, çok çeşitli bitki türleri için tercih edilen azot kaynağıdır (Nacry ve diğ. 2013) ve bu nedenle aerobik çürümenin son ürünü, mahsul üretimi için bir gübre olarak kullanılabilir. Mineralizasyon sürecini iyileştirmek ve besinlerin geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak için organik katı atıkların aerobik sindirimi hafif asidik ortamda gerçekleştirilmelidir (Khiari ve diğ. 2019). Bu pH koşullarında, sırasıyla amonyak buharlaşması ve iyon çökeltmesi yoluyla nitrojen ve besin kayıpları minimum olacaktır (Khiari ve diğ. 2020).

#### **2.4.5.4 Aerobik Biyoreaktör Depolama**

Anaerobik depolama alanlarının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini minimum indirmek amacı ile aerobik biyoreaktör depolama alanları üzerinde hummalı çalışmalar yapılmıştır (Slezak ve diğ. 2015). Aerobik biyoreaktörler için depolama alanına hava enjeksiyonu yenilikçi bir teknolojidir (Harmankaya 2013). Aerobik biyoreaktör depolama sistemleri, hücresel solunum için ortam koşullarını en uygun hale getirerek atığın bozunmasını hızlandırmayı (Warith 2003), metan gazı içeriğini azaltmayı hedefleyen bir yöntemdir (Reinhart ve diğ. 2002). Aerobik solunumdaki enerji, oksijen tüketen-karbondioksit üreten bir proseste organik moleküllerden elde edilir. Şekil 2.5'te aerobik biyoreaktör depolama sahası tasarımı gösterilmektedir (Warith 2003).



Şekil 2.5: Aerobik biyoreaktör tasarımı

Bu biyoreaktör sistemleri, mikroorganizmaların yaşamsal aktivitelerini sürdürebilmesi adına yatay ve / veya dikey boruların bağlantısı aracılığıyla atık kütlesi içine kontrollü olarak nem (sızıntı suyu geri devri ile) ve hava enjeksiyonu ile işletilmektedir (Speight ve diğ. 2011). Aerobik biyoreaktörün geçerli bir şekilde çalışması optimum aralıklarda korunan sıcaklığa (60-70 °C) (Kumar ve diğ. 2011) ve neme bağlıdır (Read ve diğ. 2001). Ayrıca hava enjeksiyonu ayrışma süreçlerini hızlandırmaktadır (Cossu ve diğ. 2016). Depolanan atıklar uygun hava ve nem sağlanmış ortamlarda, anaerobik şartlara göre çok daha kısa sürede stabil hale gelmektedir (Köse ve Demir 2020). Bunun sebebi aerobik solunumdaki enerji üretimi anaerobik solunumdaki enerji üretiminden daha etkili olduğundan dolayı aerobik organizmalar anaerobik organizmalardan daha hızlı çoğalabilmektedir (Warith 2003). Geleneksel depolama alanlarında atık stabilizasyonuna on yıllar hatta daha uzun sürede ulaşılabilirken, aerobik depolama alanlarında aynı atığın stabilizasyonu için geçen süre iki ya da dört yıldır (Speight 2015). Aerobik proses kolayca ve orta derecede ayrışabilen bileşiklerin çoğunun ayrışmasına kadar devam eder (Hot 2012). Hava ve sızıntı suyunun kontrolsüz şekillerde sisteme verilmesi aerobik depolama alanının yetersiz performansına ve atık kütlesi sıcaklığının yükselmesine neden olabilir (Read ve diğ. 2001).

Aerobik koşullarda atığın ayrışması sırasında heterotrofik mikroorganizmalar tarafından çoğunlukla karbondioksit üretilir (Slezak ve diğ. 2015). Depolanan atığın optimum şartlarda havalandırılmasıyla sızıntı suyundaki kirlilik

konsantrasyonlarında (BOİ<sub>5</sub>, KOİ, uçucu organik bileşikler ve diğer kirlilik konsantrasyonları) azalma (Rich ve diğ. 2008), metan üretiminde engellenme ve atık kütlesinde çökme meydana gelmektedir (Erses ve diğ. 2008). Atık kütlesindeki çökmeden dolayı depo alanındaki oranın artması da aerobik biyoreaktörlerin avantajları arasındadır (Campman ve Yates 2002). Ayrıca yüksek ısıdan dolayı sızıntı suyunda büyük ölçüde buharlaşma meydana gelir (Read ve diğ. 2001) ve böylece yönetilecek sızıntı suyu daha az olur (Reinhart ve diğ. 2002).

Aerobik biyoreaktör depolama alanlarının en büyük dezavantajı, atığın havalandırılmasına bağlı olarak yüksek enerji tüketimidir. Organik maddenin ayrışması ve enerji tüketiminin en aza indirilmesi için optimum koşullar, havalandırma oranı ve sızıntı suyu geri devri gibi uygun işletme parametrelerinin seçimi ile ulaşılabilir (Slezak ve diğ. 2015). Diğer dezavantajlar ise; kontrolsüz hava ilavesi patlayıcı özelliklere sahip gaz karışımının oluşmasına neden olabilir. Ayrıca bilinmeyen gaz emisyonları olabilir yani metan ve diğer bileşiklerin (uçucu asitler ve hidrojen sülfid) emisyonları azaltılabilir ama diğer tehlikeli ve zararlı kimyasallar hala serbest kalabilir. Metandan daha güçlü sera gazı olan nitrik asit yayılabilir (Reinhart ve diğ. 2002).

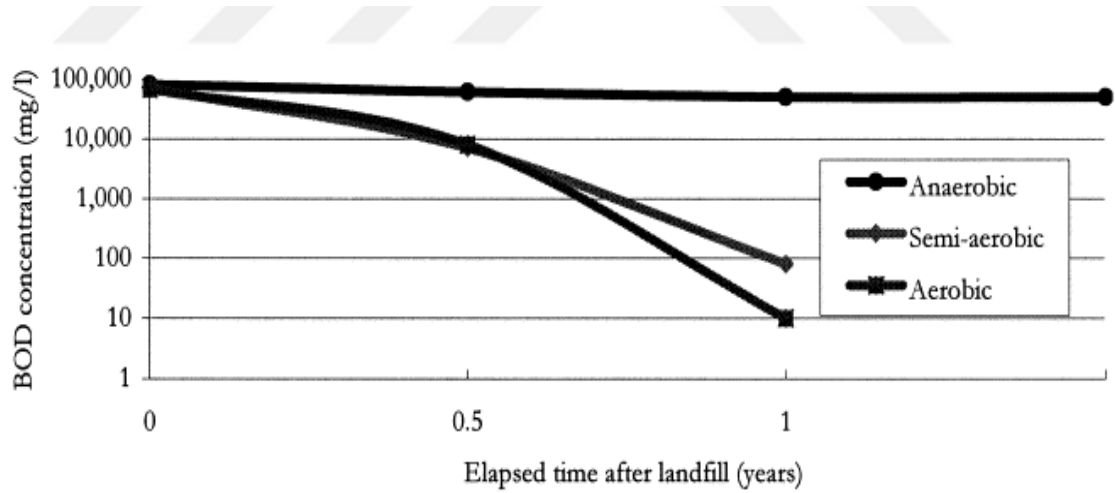
#### **2.4.5.5 Fakültatif Biyoreaktör Depolama**

Yarı aerobik biyoreaktör deponilerdir. Aynı zamanda Fukuoka yöntemi olarak da bilinmektedir. Yarı aerobik biyoreaktör depolama teknolojileri etkilidir ve özellikle Japonya'da önemli bir depolama uygulaması haline gelmiştir (Nag ve diğ. 2016). Sızıntı suyu toplama ve gaz tahliye sistemleri kullanılarak sızıntı suyu ve gaz sürekli olarak atıktan uzaklaştırılır (Theng ve diğ. 2005). Ayrışma mekanizması anaerobik olarak başlar. Bu aşama yaklaşık 5-10 yıl metan düşük seviyelere ulaşmaya kadar sürer. Son olarak aerobik aşama deponin alt tabakasından hava sirkülasyonu ile başlar. Sızıntı suyu, toplama alanında delikli borularla toplanır. Sızıntı suyu toplama kanalının bir ucu devamlı hava ile temas halinde olduğundan aerobik koşullar sağlanmış olur. Yarı aerobik sistemler, sistem içinde oluşan gaz ve sızıntı suyunun kanallar vasıtası ile devamlı olarak atık içerisinden toplandığı ve ortam havasının doğal yollardan sızıntı suyu toplama kanalları ile atık içerisine

verilmesiyle, atık stabilizasyonunun ve sızıntı suyu kalitesinin artırıldığı sistemlerdir. Sızıntı suyu ve diğer sıvılar (ör. biyokatılar, sıvı atıklar, yüzey suyu vb.) atığın nem içeriğini yükseltmek için kullanılır. Şekil 2.6'da fakültatif biyoreaktörün tasarımı gösterilmektedir (Warith 2003). Ayrıca ve Read ve diğ. (2001) tarafından yapılan bir çalışmada, anaerobik, aerobik ve fakültatif biyoreaktör depolama alanlarında zamana göre organik içeriğin karşılaştırılması yapılmıştır ve bu Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Fakültatif biyoreaktör tasarımı



Şekil 2.7: Anaerobik, aerobik ve fakültatif deponi  $BOI_5$  konsantrasyonu karşılaştırılması

Sponza ve Ağdağ (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, evsel katı atıkların anaerobik arıtımı üzerindeki sızıntı suyu devirdaimi ve devirdaim hızının etkileri, üç adet simüle edilmiş çöp sahası anaerobik biyoreaktöründe araştırılmıştır. Reaktörlerden biri sızıntı suyu geri devri olmadan, diğer iki reaktör sızıntı suyu geri devri ile çalıştırılmıştır. Sızıntı suyu geri devir oranı Reactor9'da 9 l/gün (reaktör hacminin %13'ü) iken, Reactor21'de geri devir oranı 21 l/gün (reaktör hacminin

%30'u)'dür. 220 günlük anaerobik inkübasyondan sonra, Reactor9'daki pH, KOİ, UYA konsantrasyonları, metan gazı üretimleri ve metan yüzdelerinin sızıntı suyu geri devri yapılmayan reaktör ve Reactor21'den daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. 220 günlük anaerobik inkübasyondan sonra geri devirsiz reaktör, Reactor9 ve Reactor21'de KOİ değerleri 47000, 39000 ve 52000 mg/l, uçucu yağ asidi konsantrasyonları sırasıyla 15000, 13000 ve 21000 mg/l olarak ölçülmüştür. Anaerobik inkübasyondan sonra pH değerleri sırasıyla 5,89, 6,44 ve 6,16'dır. 50 günlük inkübasyondan sonra geri devirsiz reaktör Reactor9 ve Reactor21'in ortalama metan yüzdeleri sırasıyla %30, %50 ve %40'dır.

Jun ve diğ. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, arıtma süresi boyunca aralıklı havalandırmanın ve çamur ilavesinin etkileri incelenmiştir. Reaktör A sızıntı suyu geri devirli havalandırmasız, Reaktör B sızıntı suyu geri devirli ve aralıklı havalandırmalı, Reaktör C ise sızıntı suyu geri devirli, havalandırmalı ve aktif çamur ilaveli olmak üzere 3 ayrı reaktör sistemi 35 gün boyunca işletilmiştir. İşletilen bütün reaktörler de haftada 3 kere sızıntı suyu geri devri uygulanmış (max 1,8 L) ve havalandırmalı reaktörlere çalışma başlangıcından itibaren 0,5 L/dak hava verilmiştir. Çalışma sonucunda Reaktör B'deki KOİ gideriminin Reaktör A'dakinden %13,78; Reaktör C'dekinin ise Reaktör B'dekinden %5,11 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre havalandırmanın ve çamur ilavesinin azot gideriminde etkili olduğu ve azot giderim oranlarının Reaktör A, B ve C de sırasıyla % 40, 74 ve 84 olduğu belirlenmiştir.

Slezak ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada biyoreaktörlerde, kentsel katı atıkların aerobik ve anaerobik şartlarda ayrışması incelemiştir. İki aerobik ve bir anaerobik olmak üzere 3 lizimetre ile çalışılmıştır. Havalandırma tamamlandıktan sonra anaerobik işlemlerle birlikte reaktörlerde aerobik biyobozunma işlemlerinin dinamikleri üzerinde atık havalanmasının etkisi bulunmuştur. Sonuçlar her iki deneyde atığın ayrışma fazını belirlemek için anaerobik biyobozunma işlemi ile karşılaştırılmıştır. Aerobik reaktörlerdeki deneyler çok küçük bir havalandırma oranı (0,00441 L/kg.dk) ve sızıntı suyu geri devir oranları (24,9 ve 1,58 L/m<sup>3</sup> gün) ile gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyu ve oluşan gaz kompozisyonunun değişimi, küçük bir havalandırma oranıyla bile organik maddenin ayrışmanın hızlandığını göstermiştir. Anaerobik reaktörden salınan karbondioksit ve metan miktarı aerobik reaktörlerden 5

kat daha düşüktür. Atıkların daha iyi stabilizasyonu küçük oranda sızıntı suyu geri devri ile aerobik reaktörde elde edilmiştir. Üretilen karbondioksit miktarı karşılaştırıldığında, büyük orandaki sızıntı suyu geri devri yapılan reaktörden yaklaşık %19 daha fazla üretilmiştir.

Ge ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada, biyoreaktörlerde kentsel katı atığın metan üretimi ve biyolojik bozunması üzerindeki ekzojen aerobik bakteri karışımının etkilerini ve rolünü incelemektir. Sonuçlar, ekzojen aerobik bakteri karışımı ilavesinin, kentsel katı atık bozunmasının hidroliz ve asidogenez süreçlerini etkili bir şekilde iyileştirebileceğini, uçucu katı maddede %63,95 azalma, şimdiye kadar kaydedilen en yüksek metan üretim oranı (89,83 L / kg organik madde) ve kontrolden (127,1 L) kümülatif metan üretiminde (362,9 L) üç kat artışla sonuçlanmıştır. Ek olarak, beyaz çürükçül mantarların yüksek oranda ayrışan lignin yoluyla metan üretimini daha da artırabileceği gösterilmiştir, ancak sızıntı suyundaki düşük pH değeri ve daha uzun asidojen süresi metan üretiminin azalmasına neden olmuştur. Veriler, biyoreaktörlerde kentsel katı atığın metan üretimi ve biyolojik bozunmasının, geliştirilmiş hidroliz ve asidogenez süreçleri yoluyla ekzojen aerobik bakteri karışımı tarafından önemli ölçüde artırılabilirliğini ve sonuçların gelecekteki depolama sahasının tasarımı ve yönetimi için büyük ekonomik öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Aerobik-anaerobik depolama yöntemi, katı atık yönetiminde, kapatma sonrası depolama süresini kısaltabilen ve çevresel yükleri en aza indirebilen yeni bir yaklaşımdır. Nag ve diğ. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, aralıklı havalandırma kullanılarak aerobik-anaerobik depolama yöntemi değerlendirilmiştir. Ayrıca nitrifikasyon-denitrifikasyon süreci, organik katı atığın bozunması sırasında sera gazı emisyonunun azaltılması ve sızıntı suyu kalitesinin iyileştirilmesi için bir araç olarak değerlendirilmiştir. Reaktörlerin her birinde sızıntı suyu kalitesi ve gaz bileşimi, deney süresi (408 gün) boyunca ölçülmüştür. Havalandırma işlemi, kompostlama tesisinden toplanan taze organik katı atıkla doldurulmuş pleksiglas reaktöre hava enjeksiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Sürekli havalandırma (aerobik reaktör A), haftada üç gün havalandırma (aerobik-anaerobik reaktör B), günde 6 saat havalandırma (aerobik-anaerobik reaktör C) ve havalandırmasız (havalandırmasız reaktör D) olmak üzere farklı havalandırma rutinleri uygulanmıştır. Sera gazlarının

azaltılması ve sızıntı suyu kalitesinin iyileştirilmesi açısından aerobik reaktör A'nın en iyi sonuçları ürettiği bulunmuştur. Aerobik-anaerobik reaktör C'nin hem sera gazı emisyonu hem de sızıntı suyu kalitesi açısından reaktör B'den daha etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca, aerobik reaktör A ile karşılaştırıldığında, bu reaktör çalıştırılarak enerji maliyetleri düşürülmüştür. Sonuçlar, aerobik-anaerobik depolama yönteminin sızıntı suyu kirleticilerini ve sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, eşzamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyonun meydana gelmesi, aralıklı havalandırmanın çöp sahası sonrası bakım ve enerji maliyetlerini azaltabileceği ihtimalini ortaya koymaktadır.

Hibrit Biyoreaktör Depolama Alanları biyolojik süreçleri geliştirmek ve hızlandırmak için tasarlanmış olup, depolama sahasının tamamlanmasına kadar işletme sonrası aşamanın süresini azaltmayı amaçlamaktadır. Morello ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, 6 pleksiglass reaktör üzerinde çalışılmış ve her birine 18,4 kg kentsel katı atık doldurulmuştur. İki reaktör kontrol olarak anaerobik durumlar altında çalıştırılmıştır. Hibrit laboratuvar ölçekli reaktörler farklı koşullar altında çalıştırılmıştır. Yarı aerobik, anaerobik, havalandırmalı konseptin bir laboratuvar ölçekli biyoreaktör sistemine uygulanmasının sonuçları, ön havalandırmanın anaerobik faz boyunca uçucu yağ asidi konsantrasyonlarının kontrolünde, pH değerinin ve metan üretiminin artmasında etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle aralıklı hava akışı ile metan potansiyeli kontrol reaktörlerine göre %50 daha yüksektir. Semi-aerobik, anaerobik, havalandırmalı hibrit biyoreaktörler hem metan üretimini artırmak hem de daha kısa sürede düzenli depolamanın tamamlanmasına ulaşmak için etkili bir sistem olduğu kanıtlanmıştır.

W. Li ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, kentsel katı atık ile doldurulmuş üç laboratuvar ölçekli ön havalandırmalı yarı aerobik biyoreaktör depolama sahasından sızıntı suyu kalitesi varyasyonları ve CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O emisyonları üzerinde düşük frekanslı ve yüksek frekanslı aralıklı havalandırma ve sürekli mikro havalandırma olmak üzere üç ön havalandırma stratejisinin etkileri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, bu üç stratejinin sızıntı suyu içerisindeki organik ve azot bazlı kirletici konsantrasyonunu etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir. Aralıklı havalandırma ile karşılaştırıldığında, mikro havalandırma kümülatif metan emisyonlarını (9234,3 mg) arttırmış ve daha uzun bir emisyon süresi (95 gün) ile

sonuçlanmıştır. Yüksek frekanslı aralıklı havalandırma, havalandırma sırasında organik madde kaybı nedeniyle en düşük kümülatif metan emisyonunu (4297,6 mg) ve en kısa emisyon süresine (65 gün) yol açmıştır. Yüksek frekanslı aralıklı havalandırma, maksimum kümülatif N<sub>2</sub>O emisyonu (2884,6 mg) ile sonuçlanmıştır ve sürekli mikro havalandırmaya (2281,6 mg; 151gün) kıyasla daha uzun bir emisyon süresi (179 gün) gözlemlenmiştir. Düşük frekanslı aralıklı havalandırma en uzun N<sub>2</sub>O emisyon süresine (209 gün) sahipken en düşük kümülatif N<sub>2</sub>O emisyonu (1486,3mg) ile sonuçlanmıştır.

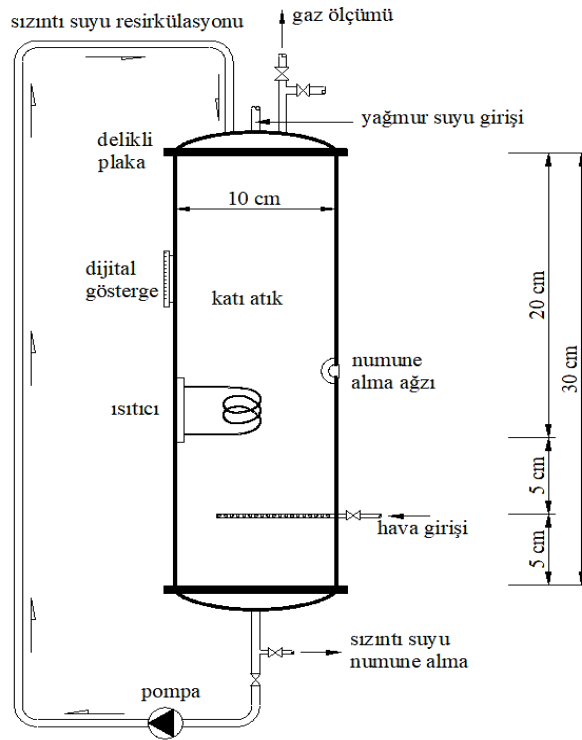
Han ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, biyoreaktörlerin evsel katı atık arıtma ve teknolojik iyileştirme gereksinimlerini karşılamak için, uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktör tasarlanmıştır. Uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktör, anaerobik ve yarı aerobik biyoreaktörlerin sıralı değişimi ile anaerobik ve yarı aerobik biyoreaktörlerin tüm avantajlarından ve farklı aşamadaki biyoreaktörlerden karışık sızıntı sularının yeniden geri devri ile tüm avantajlarından yararlanılmıştır. Sonuçlar, başlangıç aşamasından sonra, uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktöründeki sızıntı suyu pH'nın, hidroliz ve asidogenez aşamasında bile daima 6.88'den yüksek kaldığını göstermiştir. Uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktöründe azot giderimi, yarı aerobik fazda çalıştırıldığında %92,3-95,5'e ve anaerobik fazda çalıştırıldığında %49,4'e ulaşmıştır. En yüksek KOİ konsantrasyonu uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktörü sıralı anaerobik / yarı aerobik biyoreaktöründen çok daha düşük ve anaerobik parçalanma süresi daha kısa sürelerde gerçekleşmiştir. Uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktöründeki hızlı biyogaz üretim süresi sıralı anaerobik / yarı aerobik biyoreaktörünün iki katıdır ve bu da biyogaz üretiminde %70 artışa neden olmuştur. Bu nedenle, uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktör katı atık arıtımı sırasında asidojenik ve amonyak inhibisyonunu ortadan kaldırabilir, organik atık ayrışım oranını ve kapsamını artırabilir, hızla metanojenezi başlatabilir, metan üretimini artırabilir ve sıfır sızıntı suyu deşarjı (yağış sızması hariç) elde edebilmektedir. Uzay-zamansal olarak anaerobik / yarı aerobik biyoreaktör, kırsal alanlarda evsel katı atıkların arıtılmasında etkili ve uygulanabilir bir tekniktir.

Srivastava ve Chakma (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, kağıt fabrikasından ve kentsel katı atıklarından çıkan atık su tesisi çamurunun anaerobik ortak depolamasının prizmatik şekilli simüle edilmiş anaerobik depolama biyoreaktörlerinde fizibilitesini araştırmayı amaçlamaktadır. Hem atık su tesisi çamuru hem de kentsel katı atık, 0:100 (R1), 25:75 (R2), 50:50 (R3) ve 75:25 (R4) oranlarında birlikte karıştırılmıştır. Sızıntı suyu özelliklerinin ve biyometan üretiminin periyodik değerlendirmeleri 300 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Atık su tesisi çamurunun kentsel katı atık ile birlikte bertarafı, sızıntı suyunun BOİ konsantrasyonlarında önemli bir azalma göstermiştir (R2: %95,9, R3: %97,5 ve R4: %93,2). Ayrıca, R2, R3 ve R4 biyoreaktörlerinde R1'e kıyasla kümülatif metan gazı üretimi 2,974, 6,085 ve 4,653 kat daha fazladır. Gompertz büyüme modeli, gözlemlenen verilerle metan üretimi için uygun bulunmuştur. Bu ortak depolama simülasyonu, teknolojinin pilot ölçekte uygulanması için temel çalışma olabilmektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Laboratuvar Ölçekli Simüle Biyoreaktör

Tez kapsamında 2 adet anaerobik biyoreaktör kullanılmıştır. Şekil 3.1’de simüle biyoreaktörün tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Laboratuvar ölçekli simüle biyoreaktör

Biyoreaktörlerin teknik özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Biyoreaktörlerin özellikleri

ÖZELLİK	DEĞER
Yükseklik (cm)	30
Çap (cm)	10
Hacim (L)	2,4

Biyoreaktörler paslanmaz çelikten imal edilmiş olup silindir şeklindedir. Reaktörler imal ettirilirken anaerobik reaktörün aerobik şartları da sağlaması için alt bölgesinden difüzör yardımıyla hava verilmesine olanak sağlayan bir bölgesi bulunmaktadır. Isıtıcı plakalar reaktörlerde homojen olarak ısının sağlanabilmesi için reaktörlerin orta kısmına yerleştirilmiştir. Biyoreaktörler içinde bulunan ısıtıcı sayesinde mezofilik şartlarda (33-35°C) işletilmiştir. Reaktörün alt kısmında sızıntı suyunu toplamak veya geri devrettirmek için bir çıkış ağzı bulunmakta, üst kısmında da geri devir için bir giriş ağzı yer almaktadır. Sızıntı suyu, biyoreaktörlerin alt kısmından bir peristaltik pompa yardımı ile reaktörlerin üst kısmına geri devri sağlanmıştır. Sızıntı suyunun reaktör içindeki homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için kapakların alt kısmına delikli plakalar konulmuştur. Reaktörün üst kapağı atık yüklemesi için, alt kapağı ise işletme periyodu sonucunda kalan atıkların alınabilmesi için çıkarılıp takılabilmektedir. Reaktörün üst kısmında simüle edilmiş yağmur suyu ilavesi, metan ölçümü, toplam gaz üretimi, sızıntı suyunun devridaimi için üç ayrı vana bulunmaktadır. Bölgedeki meteorolojik verilere göre yağmur miktarını simüle edecek şekilde kloru uçurulmuş çeşme suyu ilavesi reaktörün üst kapağında bulunan vanadan yapılmıştır.

## **3.2 Biyoreaktör İşletme Sistemleri**

### **3.2.1 Anaerobik İşletme Koşulları**

Anaerobik işletme koşullarında biyoreaktörlerde sızıntı suyu resirkülasyonu peristaltik pompalar ile sağlandı. Reaktör hacminin %10 ila %15'i arasında sızıntı suyu resirkülasyonun metan verimi açısından çeşitli çalışmalarda uygun olduğu gösterilmiştir (Sponza ve Ağdağ, 2004). Yapılan çalışmalar ışığında resirkülasyon reaktör hacminin %15'i (300 ml) olacak şekilde ayarlanmıştır. Sızıntı suyu resirkülasyonunda kullanılan peristaltik pompalar zamanlayıcı ile 8 saate bir 15 dakika çalışacak şekilde ayarlandı. Toplam gaz ve metan gazı ölçümü için her bir reaktöre özel olarak imal ettirilen ölçekli cam malzemeler yerleştirildi. Toplam gaz için %10 NaCl ve %2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren çözelti (Beydilli ve diğ. 1998) ve metan gazı için %3'lük NaOH içeren çözeltilerin (Razo-Flores ve diğ. 1997) sıvı yer değiştirme

yöntemi ile gaz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2’de anaerobik olarak işletilen biyoreaktörün çalışma sistemi gösterilmektedir.



**Şekil 3.2:** Anaerobik biyoreaktörün çalışma sistemi

Biyoreaktörler Denizli Atık Su Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Tankından alınan anaerobik aşılama çamuru ile her birine 150 ml olacak şekilde aşılanmıştır. Aşılama yapılmasının amacı, biyoreaktörün biran evvel eklenen (metan bakterisi içeren) aşı çamuru sayesinde metanlaşma fazına geçişinin kolaylaştırılması ve sürecin kısaltılmasıdır.

### **3.2.2 Semi-aerobik / anaerobik İşletme Koşulları**

Aerobik prosesin avantajlarından biri parçalanma sürecinin anaerobik prosese göre daha hızlı olmasıdır. Bu süreç hızlı gerçekleştiğinden ortamda asit birikiminden dolayı pH değerindeki düşüş miktarı anaerobik sistemlere göre daha azdır. Bu sayede reaktöre yüklenen organik atıklardaki kirlilik parametreleri daha hızlı bir şekilde sızıntı suyuna geçip daha kısa sürelerde stabilizasyon sağlanmıştır. Aerobik koşulları sağlamak için reaktörler haftanın 5 günü bir difüzör yardımıyla 5 dk havalandırma, 3 dk dinlendirme şeklinde 1 saat boyunca havalandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aerobik işletme süreci tamamlandıktan sonra metan eldesi için sistem anaerobik

olarak işletilmiştir. Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında biyoreaktörlerde sızıntı suyu resirkülasyonu peristaltik pompalar ile sağlandı. Resirkülasyon reaktör hacminin %15'i (300 ml) olacak şekilde ayarlanmıştır. Sızıntı suyu resirkülasyonunda kullanılan peristaltik pompalar zamanlayıcı ile 8 saate bir 15 dakika çalışacak şekilde ayarlandı. Toplam gaz ve metan gazı ölçümü için her bir reaktöre özel olarak imal ettirilen ölçekli cam malzemeler yerleştirildi. Toplam gaz için %10 NaCl ve %2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren çözelti (Beydilli ve diğ. 1998) ve metan gazı için %3'lük NaOH içeren çözeltilerin (Razo-Flores ve diğ. 1997) sıvı yer değiştirme yöntemi ile gaz ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen biyoreaktörün çalışma sistemi gösterilmektedir.

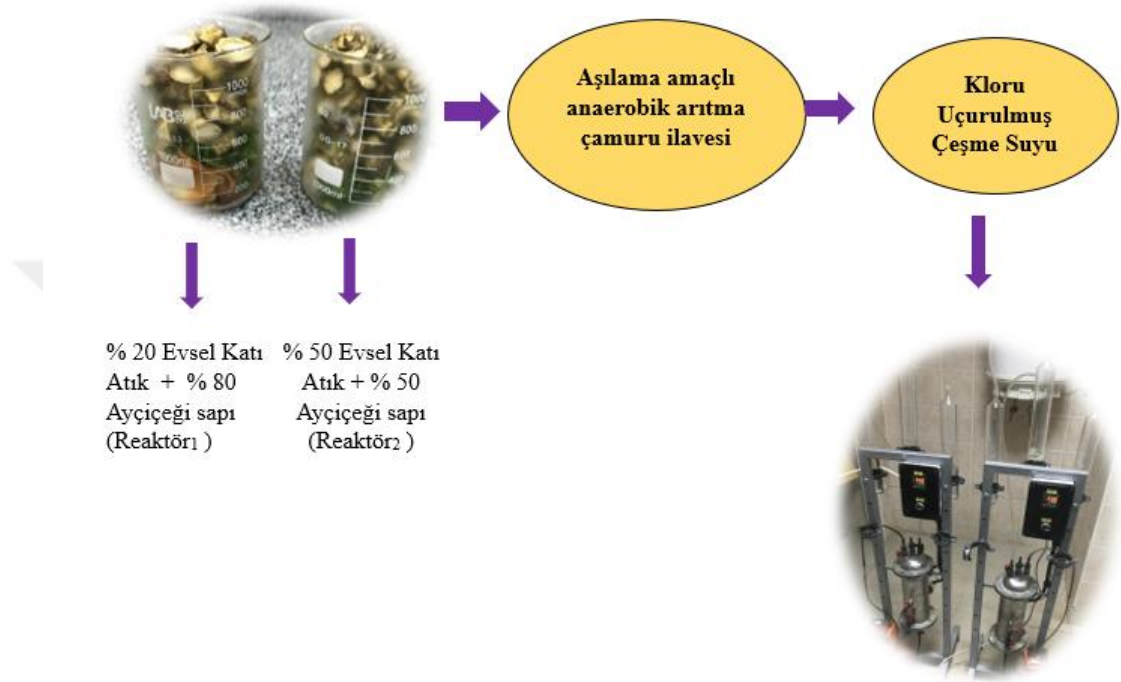


**Şekil 3.3:** Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörün çalışma sistemi (Havalandırma pompası kullanımı)

### 3.3 Reaktörlere Atıkların Yüklenmesi

#### 3.3.1 Ayçiçeği Sapının Anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi

Ayçiçeği sapının reaktörlere yüklenmesi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Ayçiçeği sapının anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi

Ayçiçeği atıkları tarım sahalarında biyolojik olarak bozunup parçalanması, yüksek lignin ve selüloz içeriğinden dolayı uygun parçalanma koşulları sağlanamayacağı için neredeyse imkansızdır ve bu ayrışma sağlanamadığı için tarımsal sahalarda ayçiçeği hasat sonrası artakalan budama atıkları kullanılmayıp atılmaktadır. Halbuki organik içeriği yüksek olan bu atıklardan metan kaynağı olarak faydalanma imkanları bulunmaktadır.

Anaerobik biyoreaktörlere yüklenen katı atıklar PAÜ merkez yemekhanesindeki mutfak atıklarından (domates, patates, kırmızı biber, soğan, maydanoz, dere otu) ve Denizli ilinin Tavas ilçesinde bulunan bir ayçiçeği tarlasından ayçiçeği budama atıkları temin edilip kullanılmıştır. Anaerobik biyoreaktörlerden ilkinde (Reaktör<sub>1</sub>) %20 evsel organik atık + %80 ayçiçeği sapı, ikinci reaktöre (Reaktör<sub>2</sub>) ise %50 evsel organik atık + %50 ayçiçeği sapı olacak şekilde karışım atık oranları belirlenip iki reaktöre de atık yüklemesi yapılmıştır.

Hazırlanan atık karışımları reaktörlere yüklenirken ilk önce %50'si sıkıştırılarak konuldu. Aşı çamuru olarak üzerlerine Denizli Atık Su Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Tankından temin edilen arıtma çamurundan iki reaktöre de 150 ml ilave edildi. Kalan atık karışımları da eklenip iki reaktöre de kloru uçurulmuş eşit miktarda çeşme suyu (1.6 L) ilave edilip reaktörlerin kapakları kapatıldı. Reaktörler anaerobik işletme koşullarında 90 gün boyunca işletildi. Kullanılan atıkların reaktörlere yüklenmeden önceki su muhtevası ve organik madde analizleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.2:** Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi

	<b>Su Muhtevası (%)</b>	<b>Organik Madde (%)</b>
<b>Reaktör 1</b>	%71	%82
<b>Reaktör 2</b>	%76	%89

Reaktörlerde kullanılan ayçiçeği sapının lignin, selüloz ve hemiselüloz miktarı (%) Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.3:** Ayçiçeği sapındaki lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%)

<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Selüloz (%)</b>
43,667	17,233	24,463

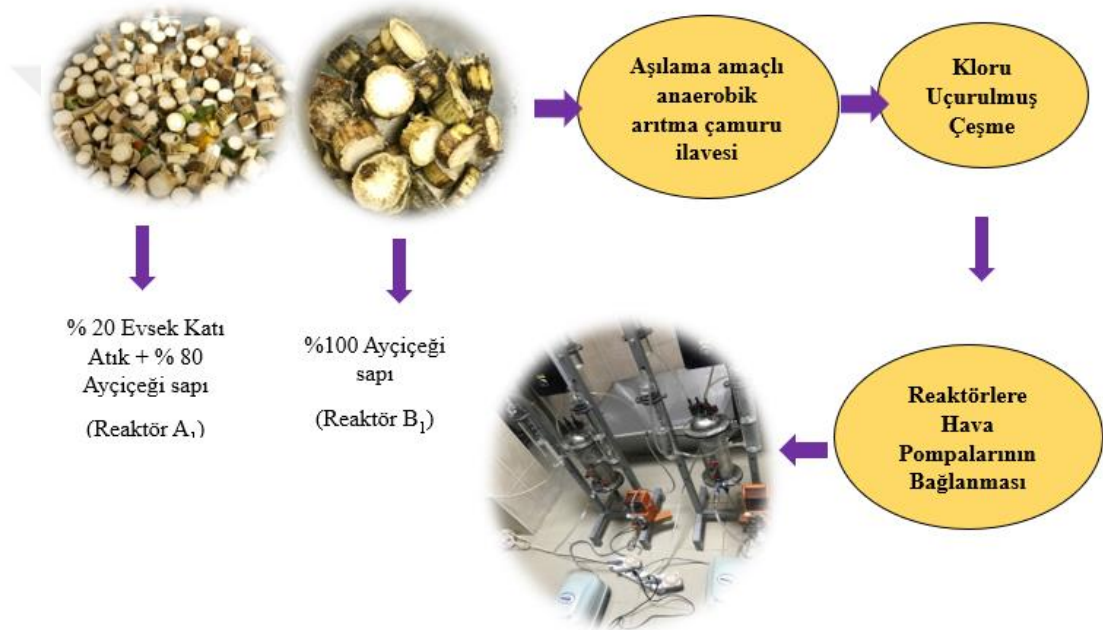
Reaktörlerde kullanılan aşı materyalinin özellikleri Tablo 3.4'te belirtilmektedir.

**Tablo 3.4:** Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri

<b>pH</b>	7,03
<b>Sıcaklık (°C)</b>	31
<b>Uçucu Yağ Asitleri (mg/l)</b>	93,96
<b>Alkalite (mg/l)</b>	731
<b>% Katı Madde</b>	1,26
<b>% Uçucu Madde</b>	65,01

### 3.3.2 Ayçiçeği Sapının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklenmesi

Ayçiçeği sapının evsel katı atıklarla anaerobik biyoreaktörlerde işletilmesi sonucunda yapılan analizler doğrultusunda evsel atığın daha az olduğu reaktörde organik maddenin parçalanması daha zor olduğu sonucuna varılmış ve semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki parçalanma üzerine etkisini incelemek için %20 evsel atık + %80 ayçiçeği karışım oranı seçilip tekrardan kullanılmıştır. Atıkların reaktörlere yüklenmesi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Ayçiçeği sapının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenmesi

Reaktörlere yüklenen katı atıklar PAÜ merkez yemekhanesindeki mutfak atıklarından (mandalina, portakal, dolmalık biber, salatalık, armut) ve Denizli ilinin Tavas ilçesinde bulunan bir ayçiçeği tarlasından ayçiçeği budama atıkları temin edilip kullanılmıştır.

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilecek biyoreaktörlerden ilkinde %20 evsel organik atık + %80 ayçiçeği sapı (Reaktör A<sub>1</sub>), ikinci reaktöre ise %100 ayçiçeği sapı (Reaktör B<sub>1</sub>) olacak şekilde karışım atık oranları belirlenip iki reaktöre de atık yüklemesi yapılmıştır. Hazırlanan atık karışımları reaktörlere yüklenirken ilk önce %50'si sıkıştırılarak konuldu. Aşı çamuru olarak üzerlerine Denizli Atık Su

Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Tankından temin edilen arıtma çamurundan iki reaktöre de 150 ml ilave edildi. Kalan atık karışımları da eklenip iki reaktöre de kloru uçurulmuş eşit miktarda çeşme suyu (1.6 L) ilave edilip reaktörlerin kapakları kapatıldı. Reaktörler anaerobik işletme koşullarında 90 gün boyunca işletildi. Kullanılan atıkların reaktörlere yüklenmeden önceki su muhtevası ve organik madde analizleri Tablo 3.5’te gösterilmektedir.

**Tablo 3.5:** Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi

	<b>Su Muhtevası (%)</b>	<b>Organik Madde (%)</b>
<b>Reaktör A<sub>1</sub></b>	%26	%88
<b>Reaktör B<sub>1</sub></b>	%12	%85

Reaktörlerde kullanılan aşı materyalinin özellikleri Tablo 3.6’da belirtilmektedir.

**Tablo 3.6:** Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri

<b>pH</b>	7,03
<b>Sıcaklık (°C)</b>	31
<b>Uçucu Yağ Asitleri (mg/l)</b>	93,96
<b>Alkalite (mg/l)</b>	731
<b>% Katı Madde</b>	1,26
<b>% Uçucu Madde</b>	65,01



ilave edildi. Kalan atık karışımları da eklenip iki reaktöre de kloru uçurulmuş eşit miktarda çeşme suyu (2 L) ilave edilip reaktörlerin kapakları kapatıldı. Reaktörler semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında 72 gün boyunca işletildi. Kullanılan atıkların reaktörlere yüklenmeden önceki su muhtevası ve organik madde analizleri Tablo 3.7’de gösterilmektedir.

**Tablo 3.7:** Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi

	<b>Su Muhtevası (%)</b>	<b>Organik Madde (%)</b>
<b>Reaktör C</b>	%23	%95
<b>Reaktör D</b>	%4	%93

Reaktörlerde kullanılan kekik atığının lignin, selüloz ve hemiselüloz miktarı (%) Tablo 3.8’de gösterilmektedir.

**Tablo 3.8:** Kekik atığının lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%)

<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Selüloz (%)</b>
41,12	26,648	26,328

Reaktörlerde kullanılan aşı materyalinin özellikleri Tablo 3.9’da belirtilmektedir.

**Tablo 3.9:** Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri

<b>pH</b>	7,03
<b>Sıcaklık (°C)</b>	31
<b>Uçucu Yağ Asitleri (mg/l)</b>	93,96
<b>Alkalite (mg/l)</b>	731
<b>% Katı Madde</b>	1,26
<b>% Uçucu Madde</b>	65,01

### 3.3.4 Park-Bahçe Atıklarının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yüklmesi

Park-bahçe atıklarının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklmesi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Park-bahçe atıklarının semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklmesi

Park-bahçe atıkları, park-bahçe alanlarının düzenlenmesi sonucu oluşan atıklardır. Bu atıklar yüksek miktarda lignin ve selüloz içeriğine sahip olduğu için biyolojik parçalanması zordur. Bu nedenle atığın yapısına uygun parçalama yöntemi ile bertaraf edilip biyogaz elde edilebilmektedir.

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenen katı atıklar PAÜ merkez yemekhanesindeki mutfak atıklarından (kavun, şeftali, muz, havuç) ve PAÜ kampüsü park-bahçe atıklarından dal, yaprak, odun, çim atıkları belirli oranlarda karıştırılıp kullanılmıştır. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerden ilkinde (Reaktör E) %20 evsel organik atık + %80 park-bahçe atığı, ikinci reaktöre (Reaktör F) ise %100 park-bahçe atığı olacak şekilde karışım atık oranları belirlenip iki reaktöre de atık yüklemesi yapılmıştır. Hazırlanan atık karışımları reaktörlere yüklenirken ilk önce %50’si sıkıştırılarak konuldu. Aşı çamuru olarak üzerlerine Denizli Atık Su Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Tankından temin edilen arıtma çamurundan iki reaktöre de 150 ml ilave edildi. Kalan atık karışımları da eklenip iki reaktöre de kloru

uçurulmuş eşit miktarda çeşme suyu (2 L) ilave edilip reaktörlerin kapakları kapatıldı. Reaktörler semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında 75 gün boyunca işletildi. Kullanılan atıkların reaktörlere yüklenmeden önceki su muhtevası ve organik madde analizleri Tablo 3.10'da gösterilmektedir.

**Tablo 3.10:** Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi

	<b>Su Muhtevası (%)</b>	<b>Organik Madde (%)</b>
<b>Reaktör E</b>	%60	%96
<b>Reaktör F</b>	%53	%94

Reaktörlerde kullanılan park-bahçe atığının lignin, selüloz ve hemiselüloz miktarı (%) Tablo 3.11'de gösterilmektedir.

**Tablo 3.11:** Park-bahçe atığının lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%)

<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Selüloz (%)</b>
40,640	28,824	12,903

Reaktörlerde kullanılan aşı materyalinin özellikleri Tablo 3.12'de belirtilmektedir.

**Tablo 3.12:** Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri

<b>pH</b>	7,03
<b>Sıcaklık (°C)</b>	31
<b>Uçucu Yağ Asitleri (mg/l)</b>	93,96
<b>Alkalite (mg/l)</b>	731
<b>% Katı Madde</b>	1,26
<b>% Uçucu Madde</b>	65,01

### 3.3.5 Fındık Zürufunun Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlere Yükleneesi

Fındık zürufunun semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yükleneesi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Fındık zürufunun semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yükleneesi

Fındık zürufu, fındığın büyüme sürecinde etrafını saran ve koruyan yeşilimsi bitki yapılarıdır. Hasat zamanında bu bitki yapısı fındıkla birlikte toplanır ve fabrikada fındıktan ayrıştırılarak atığa dönüştürülür. Fındık zürufu, Türkiye’de bol miktarda bulunan tarımsal atık kaynağıdır. Dünya fındık üretiminin %73’üne ev sahipliği yapan Türkiye, dünyanın en büyük fındık üreticisidir (400.000-450.000 ton / yıl). Her yıl fındık hasadından sonra fındık atıkları yakılmakta veya tarlada bırakılmaktadır (Çöpür ve diğ. 2007). Dünya fındığının büyük çoğunluğu Türkiye’de üretilmesine rağmen, fındık üretimi ile ilgili atıklar biyogaz üretimi ile ilgili olarak değerlendirilmemiştir.

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere yüklenen katı atıklar PAÜ merkez yemekhanesindeki mutfak atıklarından (kavun, şeftali, muz, kırmızı biber, mor lahana, armut) ve Ordu ilindeki bir fındık tarlasının hasat sonucunda oluşan fındık zürufundan temin edilip kullanılmıştır. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerden ilkinde (Reaktör G) %20 evsel organik atık + %80 fındık zürufu, ikinci reaktöre

(Reaktör H) ise %100 fındık zürufu olacak şekilde karışım atık oranları belirlenip iki reaktöre de atık yüklemesi yapılmıştır. Hazırlanan atık karışımları reaktörlere yüklenirken ilk önce %50'si sıkıştırılarak konuldu. Aşı çamuru olarak üzerlerine Denizli Atık Su Arıtma Tesisi Anaerobik Çamur Tankından temin edilen arıtma çamurundan iki reaktöre de 150 ml ilave edildi. Kalan atık karışımları da eklenip iki reaktöre de kloru uçurulmuş eşit miktarda çeşme suyu (2 L) ilave edilip reaktörlerin kapakları kapatıldı. Reaktörler semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında 50 gün boyunca işletildi. Kullanılan atıkların reaktörlere yüklenmeden önceki su muhtevası ve organik madde analizleri Tablo 3.13'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.13:** Kullanılan katı atıklardaki su muhtevası ve organik madde analizi

	<b>Su Muhtevası (%)</b>	<b>Organik Madde (%)</b>
<b>Reaktör G</b>	%77	%95
<b>Reaktör H</b>	%64	%93

Reaktörlerde kullanılan fındık zürufunun lignin, selüloz ve hemiselüloz miktarı (%) Tablo 3.14'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.14:** Fındık zürufunun lignin, selüloz, hemiselüloz miktarı (%)

<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Selüloz (%)</b>
47,167	33,959	6,450

Reaktörlerde kullanılan aşı materyalinin özellikleri Tablo 3.15'te belirtilmektedir.

**Tablo 3.15:** Reaktörlerde kullanılan aşı çamurunun özellikleri

<b>pH</b>	7,03
<b>Sıcaklık (°C)</b>	31
<b>Uçucu Yağ Asitleri (mg/l)</b>	93,96
<b>Alkalite (mg/l)</b>	731
<b>% Katı Madde</b>	1,26
<b>% Uçucu Madde</b>	65,01

## 4. ANALİTİK YÖNTEMLER

### 4.1 Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Ölçümü

Toplam KOİ, kapalı refluks yöntemi ile kolorimetrik olarak ölçülmüştür (APHA AWWA 1992). Alınan sızıntı suyu örneklerinin KOİ değerleri yüksek olduğu düşünülüp belirlenen oranlarda seyreltmeler yapılmıştır. Yapılan seyreltmeler sonucunda örneklerden 2,5 ml alınıp deney tüplerine konulmuştur ve üzerlerine 1,5 ml  $K_2Cr_2O_7$  çözeltisi ve 3,5 ml  $H_2SO_4$  çözeltilerinden ilave edilmiştir. Şahit için 2,5 ml distile su deney tüpüne konulmuştur ve üzerine 1,5 ml  $K_2Cr_2O_7$  çözeltisi ve 3,5 ml  $H_2SO_4$  çözeltilerinden ilave edilmiştir. Tüplerin ağzı kapatılıp hafifçe çalkalanmıştır.  $148^{\circ}C$ 'ye ısıtılmış termoreaktöre (WTW CR 2200) (Şekil 4.1) konulan deney tüpleri 2 saat bekletilmiştir. 2 saatlik reaksiyon süresini tamamlayan deney tüpleri termoreaktörden çıkarılıp soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan deney tüpleri  $600\text{ nm}$ 'ye ayarlanmış spektrofotometrede absorbans değerleri ölçülmüştür. Elde edilen absorbans değerleri oluşturulan kalibrasyon eğrisindeki formülde yerine konularak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: Termoreaktör

## 4.2 pH

Biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyu numuneleri HANNA HI 221 (Şekil 4.2) model pH metre kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2: pH metre

## 4.3 Uçucu Yağ Asidi

Uçucu yağ asidi konsantrasyon ölçümleri Anderson ve Yang (1992) tarafından belirlenen titrimetrik yöntemle belirlenmiştir. Biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyu numunelerinin pH değeri ölçülmüştür. Alınan numunenin 0,1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi ile pH değerinin 5,1'e titre edilip sarfiyat kaydedilmiştir. Daha sonra pH 4,3'e kadar titre edilip sarfiyat ölçülmüştür ve ardından pH 3.5'e kadar titre edilerek UYA konsantrasyonları (4.1, 4.2) eşitliklerine göre hesaplanmıştır.

$$A1 = \frac{[HCO_3^-] \times ([H]_2 - [H]_1)}{[H]_1 + K_C} + \frac{[V_A] \times ([H]_2 - [H]_1)}{[H]_2 + K_{V_A}} \quad (4.1)$$

$$A2 = \frac{[HCO_3^-] \times ([H]_3 - [H]_1)}{[H]_3 + K_C} + \frac{[V_A] \times ([H]_3 - [H]_1)}{[H]_3 + K_{V_A}} \quad (4.2)$$

Bu denkleme,

A1 ve A2; pH = 5.1 ve pH = 3.5'de tüketilen asidin molar eşdeğer değeridir.

[HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>]; bikarbonat konsantrasyonu

$[V_A]$ ; uçucu yağ asidi iyon konsantrasyonu

$[H]_{1,2,3}$  ; orijinal örneğin hidrojen iyonu konsantrasyonları

$K_C$ ; karbonik asidin ayrışma hız sabiti

$K_{VA}$ ; uçucu yağ asitlerinin toplam ayrışma hız sabiti ( $C_2-C_6$ )

Bikarbonat için  $K_C = 6.6 \times 10^{-7}$

Uçucu yağ asitleri için  $K_{VA} = 2.4 \times 10^{-5}$ 'dir.

#### 4.4 Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ<sub>5</sub>) Ölçümü

BOİ<sub>5</sub>, WTW Oxi Top IS sistem kullanılarak ölçülmüştür. BOİ, KOİ değerinin yaklaşık %80'i olarak kabul edilmiş ve sızıntı suyu numunelerinde belirli oranda seyreltme yapılmıştır. Yöntemde belirli okuma değerlerine karşılık gelen tablodan faktör değeri seçilmiştir. BOİ şişelerine (Şekil 4.3) seçilen faktör değerine karşılık gelen numune miktarı (ml) ve şişelerin içerisine inkübasyon süresi boyunca karışmasının sağlanması için manyetik balıklar konulmuştur. Kauçuk tıpların içine nem tutması amacı ile 2-3 adet NaOH tableti konulmuştur. Başlıktaki S-M tuşlarına 2 saniye basılıp sıfırlanarak inkübatöre yerleştirilmiştir. 5 günlük inkübasyon sonucunda aşağıdaki (4.3) eşitliğe göre BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları hesaplanmıştır.

$$BOİ_5 \text{ (mg/l)} = D \times f \times SF \quad (4.3)$$

Bu denklemden,

D; seyreltilmiş örneğin 5 günlük inkübasyondan sonraki çözünmüş oksijen konsantrasyonu (mg/l)

f; faktör (cihazın kullanım kılavuzuna göre belirlenen değer)

SF; yapılan seyreltme oranıdır.



Şekil 4.3: BOI<sub>5</sub> analizinde kullanılan ekipmanlar

#### 4.5 Amonyum Azotu (NH<sub>4</sub>-N) Analizi

Amonyum azotu analizi standart method (4500-NH<sub>3</sub> (B, C)) yöntemi ile yapılmıştır. Kjeldahl balonlarına belirlenen seyreltme oranında hazırlanan sızıntı suyu numunelerinden 150 ml konulmuştur. Kjeldahl balonlarına 25 ml Borat buffer (9,5 g Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10 H<sub>2</sub>O/L) çözeltisi ilave edilmiştir. pH 9,5'in üzerinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Eğer bu pH değeri sağlanmamışsa 6 N NaOH çözeltisi pH değeri sağlanana kadar damlatılmıştır. Distilasyon işlemi için cihaz (Şekil 4.4) 4 dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Kjeldahl balonu distilasyon ünitesine yerleştirilmiştir. Erlenlere 25 ml borik asit (40 g/l) çözeltisinden ilave edilmiştir. Distilasyon işlemi sonrasında erlene toplanan numuneler 0,02 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi ile titre edilip aşağıdaki (4.4) eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\text{NH}_4 - \text{N (mg/l)} = \frac{(A-B)}{\text{Numune hacmi (ml)}} \times 280 \quad (4.4)$$

Bu denklemde,

A; numune için titre edilen H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hacmi (ml)

B; şahit için titre edilen  $H_2SO_4$  hacmidir (ml).



Şekil 4.4: Distilasyon ünitesi

#### 4.6 Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) Tayini

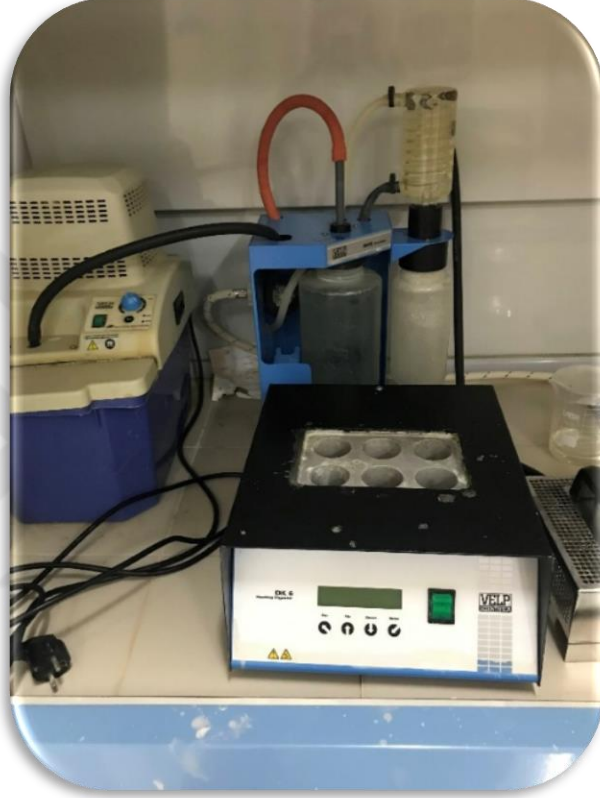
Kjeldahl Azotu analizleri standart method (4500-Norg B) yöntemi ile yapılmıştır. Kjeldahl balonlarına belirlenen seyreltme oranında hazırlanan sızıntı suyu numunelerinden 150 ml konulmuştur. Üzerine 5-6 adet kaynama taşı ve katalizör olarak 1 adet kjeldahl tableti havanda ezilip ilave edilmiştir. Hazırlanan Kjeldahl balonlarına 10 ml  $H_2SO_4$  ilave edilip azot-protein parçalama cihazına (Şekil 4.5) yerleştirilmiştir. Parçalama işlemi önce  $330^{\circ}C$ 'de 80 dakika daha sonra  $420^{\circ}C$ 'de ise 40 dakika tutularak renkleri nil yeşili olunca Kjeldahl balonları cihazdan çıkarılmıştır. İşlem bitiminde Kjeldahl balonları soğumaya bırakılmıştır. Kjeldahl balonları soğuduktan sonra üzerine 100 ml distile su ilave edilmiştir ve distilasyon işlemi için %50'lik  $NaOH-Na_2S_2O_3$  çözeltisi yavaş bir şekilde ilave edilmiştir. Kjeldahl balonları azot distilasyon cihazına yerleştirilip erlenlere 25 ml borik asit (40g/l) çözeltisinden ilave edilmiştir. Distilasyon işlemi sonrasında erlene toplanan numuneler 0,02 N  $H_2SO_4$  çözeltisi ile titre edilip aşağıdaki (4.5) eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\text{TKN (mg/l)} = \frac{(A-B)}{\text{Numune hacmi (ml)}} \times 280 \quad (4.5)$$

Bu denklemde,

A; numune için titre edilen H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hacmi (ml)

B; şahit için titre edilen H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hacmidir (ml).



Şekil 4.5: Azot-protein cihazı

#### 4.7 Toplam Gaz Ölçümü

Biyoreaktörlerde oluşan toplam gaz, sıvı yer değiştirme metodu ile (Şekil 4.6) %10 NaCl ve %2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren çözeltilerden geçirilmesiyle ölçülmüştür (Beydilli ve diğ. 1998).



Şekil 4.6: Toplam gaz ölçüm düzeneği

#### 4.8 Metan Gazı Ölçümü

Biyoreaktörlerde oluşan metan gazı, sıvı yer değiştirme metodu ile (Şekil 4.7) %3'lük NaOH içeren çözeltiden geçirilmesiyle ölçülmüştür (Razo-Flores ve diğ. 1997).



Şekil 4.7: Metan ölçüm düzeneği

## 4.9 Su Muhtevası ve Organik Madde Analizi

Katı atıkta su içeriği ve organik madde analizleri, Standart Method'a göre biyoreaktörlere yükleme işlemi yapılmadan önce ve işletme sonrası yapılmıştır (APHA AWWA 1992).

## 4.10 Kimyasal Analiz

Biyoreaktörlerde kullanılan tarımsal atıkların yapısını oluşturan ekstraktif maddeler, hemiselüloz, lignin ve selüloz içerikleri aşağıda belirtilen işlemler ile analitik yöntemlerden faydalanılarak belirlenmiştir (Li ve diğ. 2004).

### 4.10.1 Ekstraktif Madde Tayini

Kurutulmuş biyokütle numunesi ( $G_0$ ), 3 saat boyunca sabit bir sıcaklıkta benzen / etanol (hacim olarak 2:1) karışımı ile ekstraksiyon yapılmıştır (Şekil 4.8). Havada kurutulduktan sonra kalıntı, sabit bir ağırlığa kadar 80°C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra kalıntı bir desikatörde oda sıcaklığına soğutulmuştur ve ardından tartılmıştır ( $G_1$ ). Ekstraktif madde yüzdesi (4.6) eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$W_1 = \frac{(G_0 - G_1)}{G_0} \times 100 \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte,

$W_1$ ; ekstraktif madde yüzdesi

$G_0$ ; biyokütle örneğinin ekstraksiyon işlemi öncesindeki kütle (g)

$G_1$ ; ekstraksiyon işleminden sonra kalan kalıntının kütlesidir (g).



Şekil 4.8: Ekstraksiyon işlemi

#### 4.10.2 Hemiselüloz Tayini

Ekstraksiyon analizinden kalan ve sabit tartıma getirilmiş katı bakiye ( $G_1$ ) tartılmıştır. Katı bakiyeden 1 g numune alınmıştır ve 500 mililitrelik balona konulmuştur. Üzerine 20 g/l konsantrasyondaki NaOH çözeltisinden ilave edilen örnek, 3,5 saat geri soğutucu altında NaOH çözeltisi ile muamele edilmiştir (Şekil 4.9). İşlem sonunda katı bakiye filtrasyon ile ayrılmıştır, katı bakiye nötral pH değerine gelinceye kadar saf su ile yıkanmıştır. Yıkanan katı bakiye etüvde 80°C'de sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra bir desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve ardından tartılmıştır ( $G_1$ ) (Şekil 4.10). Hemiselüloz ağırlık yüzdesi (4.7) eşitliğine göre hesaplanmıştır.

$$W_2 = \frac{(G_1 - G_2)}{G_0} \times 100 \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte,

$W_2$ ; hemiselüloz yüzdesi

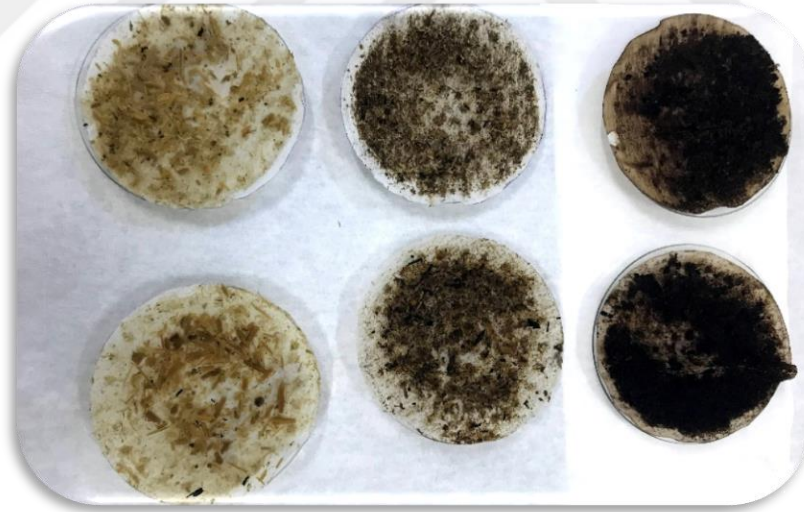
$G_0$ ; başlangıçta alınan numunenin kütlesi (g)

$G_1$ ; ekstraktif madde ekstraksiyon işleminden sonra kalan kalıntının kütlesi (g)

G<sub>2</sub>; alkali muameleden sonra sabit tartıma getirilen katı bakiyenin kütlesidir (g).



Şekil 4.9: Hemiselüloz tayini



Şekil 4.10: Etüv sonrası sabit tartıma getirilen numuneler

### 4.10.3 Lignin Tayini

Ekstraktif madde miktarı tayini sonunda kalan kalıntıdan, 1 g örnek alınarak sabit tartıma getirilmiştir ve 500 ml balona konulmuştur (G<sub>3</sub>). Sabit tartıma getirilen örneğin üzerine yavaşça %72'lik 30 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi eklenmiştir ve karışım 8-

15°C sıcaklık aralığında 24 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda karışımın üzerine 300 ml saf su eklenmiştir. Karışım 1 saat geri soğutucu altında kaynatılmıştır. İşlem sonrası (Şekil 4.11) katı bakiye filtrasyonla ayrılmıştır, sülfat iyonu kalmayana kadar saf su ile yıkanmıştır. Katı bakiye 80°C etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur ve desikatörde soğutulup tartılmıştır (G<sub>4</sub>). Ligninin ağırlıkça yüzdesi (4.8) eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$W_3 = \frac{G_4 \times (1 - W_1)}{G_3} \times 100 \quad (4.8)$$

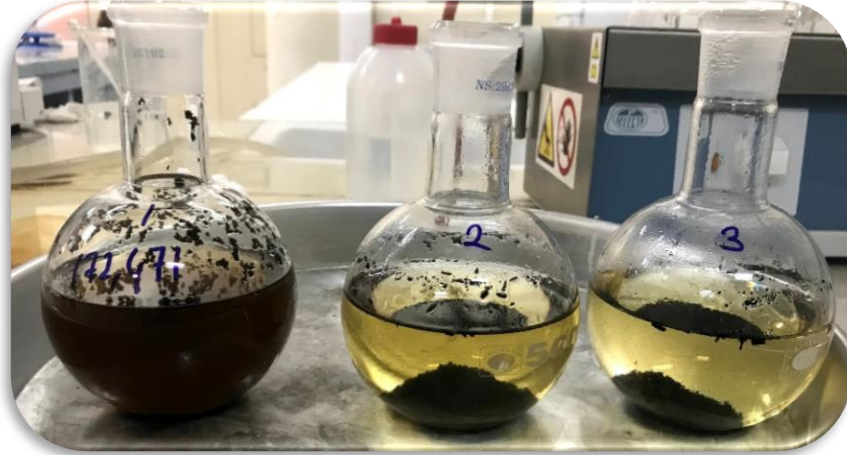
Bu denkleme,

W<sub>3</sub>; lignin yüzdesi

W<sub>1</sub>; ekstraktif madde yüzdesi

G<sub>3</sub>; ekstraktif madde ekstraksiyon işlemi sonucunda kalan kalıntıdan alınan örnek kütlesi (g)

G<sub>4</sub>; lignin analizi sonucu sabit tartıma getirilen kalıntı kütlesidir (g).



Şekil 4.11: Geri soğutma işleminden sonra numuneler

#### 4.10.4 Selüloz Tayini

Her bir biyokütle örneğinin yüzde selüloz içeriği aşağıdaki (4.9) eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır.

$$W_4 = 100 - (\%K\ddot{u}l + W_1 + W_2 + W_3) \quad (4.9)$$

Bu denklemde,

$W_4$ ; sel\ddot{u}loz y\ddot{u}zdesi

$W_1$ ; ekstraktif madde y\ddot{u}zdesi

$W_2$ ; hemisel\ddot{u}loz y\ddot{u}zdesi

$W_3$ ; lignin y\ddot{u}zdesidir.



## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Ayçiçeği Sapının Anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması

Ayçiçeği sapı, organik fraksiyonlu evsel atıklarla %20 evsel + %80 ayçiçeği sapı (Reaktör<sub>1</sub>) ve %50 evsel + %50 ayçiçeği sapı (Reaktör<sub>2</sub>) oranlarında karıştırılarak laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde anaerobik koşullarda parçalanmaya bırakılmıştır. Katı atıkta çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ayçiçeği sapında lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyunda ise KOİ, pH, UYA, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları çalışma periyodu boyunca ölçülmüştür. Bunların yanı sıra reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı da ölçülmüştür.

Ön deneme amacıyla biyoreaktörler anaerobik olarak işletilmiş olup yapılan analiz sonuçları doğrultusunda, ayçiçeği sapının fazla olduğu reaktörde lignin ve selüloz içeriğinin yüksek olması sebebi ile parçalanma hızının evsel atığın fazla olduğu reaktöre göre daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bir sonraki işletme koşulu olan semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında oran olarak ayçiçeği sapının fazla olduğu reaktör seçilip reaktörlerde parçalanması gözlemlenmiştir.

#### 5.1.1 Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi

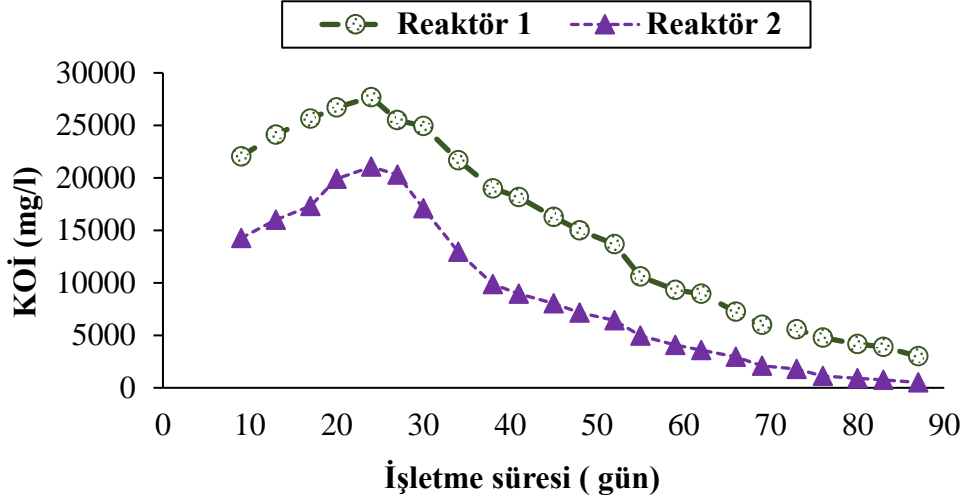
90 gün boyunca anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyu örneklerindeki KOİ konsantrasyonları Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Anaerobik biyoreaktörlere ait sızıntı suyu örneklerinde başlangıç KOİ konsantrasyonları sırasıyla; Reaktör<sub>1</sub>'de 22026 mg/l, Reaktör<sub>2</sub>'de 14250 mg/l'dir. Biyoreaktörlerde KOİ konsantrasyonları 13. günden itibaren artış göstermiş ve en yüksek KOİ değerlerine 24. günde ulaşılmıştır. 24. gündeki bu konsantrasyonlar Reaktör<sub>1</sub> ve Reaktör<sub>2</sub>'de sırasıyla 27695 mg/l ve 21050 mg/l'dir. KOİ değerlerindeki bu artış 30. güne kadar devam etmiştir. İlk 30 günlük çalışma periyodunda, reaktörlerdeki atık içerisinde bulunan organik maddenin sızıntı suyuna geçişi ile sızıntı suyu KOİ

konsantrasyonları yükselmiştir. 30. günden itibaren ise alınan sızıntı suyu örneklerindeki KOİ konsantrasyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Sızıntı sularının KOİ değerlerinde gözlemlenen bu azalmanın nedeni, anaerobik ayrışmanın hidroliz ve asitleşme safhası tamamlanmış olup metanlaşma safhasına geçmesi ve sızıntı suyundaki organik maddenin zaman içerisinde metan gazına dönüşmesidir. Yukarıda ifade edildiği ve Şekil 5.1'den de anlaşıldığı üzere, yüksek lignin ve selüloz içeriğine sahip ayçiçeği sapı atıklarının fazla olduğu Reaktör<sub>1</sub>'de sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları Reaktör<sub>2</sub>'ye göre daha yüksektir. Reaktör<sub>1</sub>'deki bu yüksek KOİ konsantrasyonu çalışma periyodu boyunca da devam etmiştir. 90 günlük anaerobik işletme sonucunda Reaktör<sub>1</sub>'deki KOİ konsantrasyonu 3000 mg/l, Reaktör<sub>2</sub>'deki KOİ konsantrasyonu ise 514 mg/l olarak ölçülmüştür. KOİ giderim verimleri hesaplandığında Reaktör<sub>1</sub>'de %90, Reaktör<sub>2</sub>'de ise bu değer %97 olarak hesaplanmıştır.

Dumlu ve diğ. (2021), domates, biber, salatalık, patlıcan ve kabak üretiminden kaynaklanan kök, sap, yaprak ve meyvelerden oluşan tarımsal atıkların ön işleme tabi tutulmadan 100 günlük anaerobik çürümesi sonucunda %60,49 KOİ giderim verimi sağlandığını bildirmişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan tarımsal atıkların selüloz içeriği %26,40, lignin içeriği ise %12,28'dir. Bizim çalışmamızda kullanılan ayçiçeği sapının literatürdeki bu çalışmadan selüloz içeriğinin daha düşük olması ayrıca ayçiçeği sapının organik fraksiyonlu evsel atıklarla karıştırılması sonucunda daha yüksek KOİ giderim verimleri sağlandığı söylenebilir.

Cheng ve diğ. (2016), yüksek sülfat içeren pirinç samanının seyreltik sülfürik asitle muamele edilmiş hidrolizatının, kısa bir çürütme süresi içinde granül çamurla mezofilik çürütme altında metan üretimi için uygun bir substrat olduğunu ilk kez kanıtlamışlardır. Kesikli anaerobik çürütme işlemi, pH 8,5 ve 37 °C sıcaklıkta farklı başlangıç KOİ konsantrasyonlarında gerçekleştirilmiştir. 3000 ile 11000 mg/l arasında değişen başlangıç KOİ konsantrasyonları arasında, yüksek KOİ uzaklaştırma verimliliği (%94,17±1,67) elde edilmiştir. Literatürde yapılan bu çalışmada pirinç samanı ön işleme tabi tutulmuş ve %94'lük KOİ giderim verim elde edilmiştir. Bizim çalışmamızda ise reaktörlerde kullanılan atıklara kimyasal bir ön işleme tabi tutulmadan bu çalışmaya benzer bir şekilde KOİ giderim verimleri elde edilmiştir.

90 günlük çalışma süresi boyunca ölçülen KOİ konsantrasyonları lignin ve selüloz içeriği yüksek atıkların anaerobik koşullarda zor parçalandığını göstermektedir.



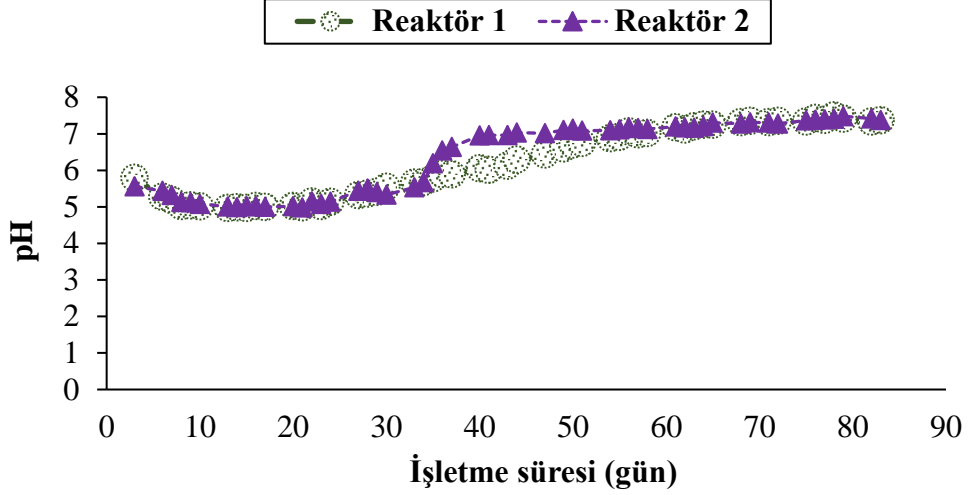
Şekil 5.1: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi

### 5.1.2 Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimi

pH anaerobik arıtmanın tüm safhalarında anaerob bakterilerin gelişmesini etkilediği için önemli bir parametredir. Biyokimya açısından, hammadde parçalanmasının erken aşamaları asidik bir ortam gerektirirken, daha sonraki aşamalarda, metan üretildiğinde nötr bir pH ortamı avantajlıdır. Bu nedenle, hidroliz ve asidojenik aşamaları için pH değeri 4,0 ile 6,5 arasında, metanojenik aşamasında ise yaklaşık olarak 7,0 olmalıdır (J. Kim ve diğ. 2003). Metanojenik aşamada pH değeri 6,5'in altına düşerse, hidroliz bakterileri tarafından organik asitlerin üretimi pH değerleri daha fazla düşer ve muhtemelen fermantasyonun durmasına yol açar (Deublein ve Steinhauser 2011).

Anaerobik işletme koşullarında sızıntı suyunda ölçülen pH değerleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.2'deki pH değerleri incelendiğinde biyoreaktörlerde anaerobik arıtmanın ilk safhalarında reaktörlerde asit birikimi meydana gelmiş ve pH değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Ortama alkalinite sağlamak ve pH değerlerini yükseltmek için işletmenin 21. gününden 51.gününe kadar belirli aralıklarla istenilen pH değerleri elde edilene kadar %0,6'lık  $\text{NaHCO}_3$  çözeltilisinden ilave edilmiştir. 25.

günden itibaren pH değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Özellikle 34. ve 56. gün arasında Reaktör<sub>2</sub>'nin pH değeri Reaktör<sub>1</sub>'e göre daha yüksektir. Bunun nedeni Reaktör<sub>2</sub>'deki lignin ve selüloz içeriği yüksek olan ayçiçeği sapı oranının Reaktör<sub>1</sub>'e göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. pH değerleri Reaktör<sub>1</sub> ve Reaktör<sub>2</sub>'de sırasıyla 4,96-7,43 ve 4,98-7,48 arasında ölçülmüştür.



Şekil 5.2: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi

### 5.1.3 Biyoreaktör Sızıntı Sularında UYA Konsantrasyonları Değişimi

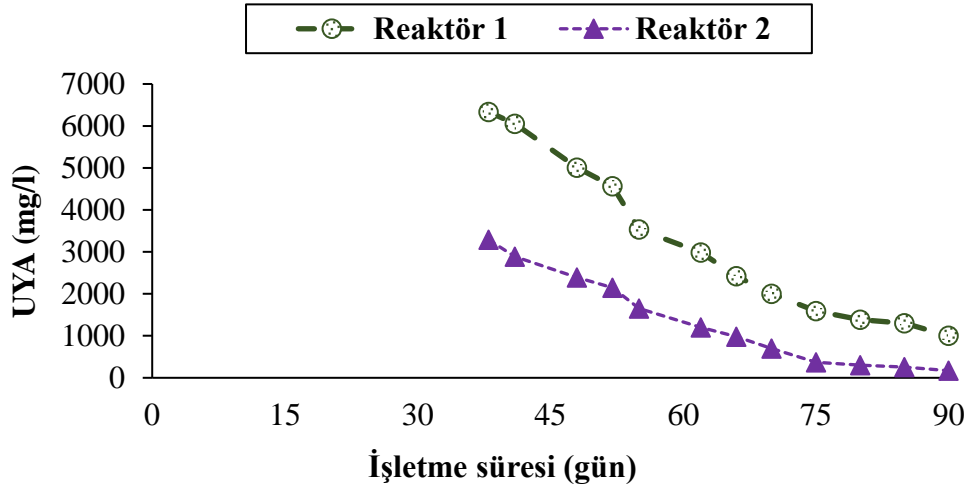
UYA oluşumu, asidojenez sürecinden kaynaklanan anaerobik reaksiyonun ikinci aşamasıdır. UYA konsantrasyonu ayrıca metan üretimini azaltan anaerobik sürecin metanojenez aşamasını da etkiler (Dhamodharan ve diğ. 2015).

Anaerobik biyoreaktörlerde oluşan sızıntı suyundaki UYA konsantrasyonlarındaki değişimler Şekil 5.3'te gösterilmektedir. UYA analizi Anderson ve Yang (1992) tarafından belirlenen yöntemde ölçüm yapılabilmesi için sızıntı suyundaki pH değerinin 5,5-7,65 arasında olmalıdır. Bu pH değerleri işletme periyodunun ilk 33 günü sağlanamadığı için ölçüm yapılamamıştır. Hobbs ve diğ. (2018), anaerobik parçalanmada asidojenez aşamasında UYA'ların oluştuğu ve genellikle pH değerinde bir düşüşe neden olduğu, düşük pH'ın metanojenlerin aktivitesini etkilediği ve dolayısıyla metan üretiminde hızlı bir düşüşü etkilediği bildirilmiştir.

Ortama alkalinite sağlamak ve pH değerlerini yükseltmek için işletmenin ilk aşamalarında istenilen pH değerleri sağlanana kadar %0,6'lık NaHCO<sub>3</sub> çözeltisi ilave edilmiştir. 38. günde ölçülen UYA konsantrasyonları Reaktör<sub>1</sub> ve Reaktör<sub>2</sub>'de sırasıyla 6335 mg/l ve 3290 mg/l'dir. UYA konsantrasyonları KOİ konsantrasyonlarına benzer bir şekilde azalma göstermiştir (Xu ve diğ. 2015). Reaktörlerin işletilmesi süresi boyunca Reaktör<sub>2</sub>'de Reaktör<sub>1</sub>'e göre daha yüksek pH değerlerine sahipti. Bunun sonucunda Reaktör<sub>2</sub>'de daha düşük UYA konsantrasyonları ölçüldü. UYA, pH ile ters orantılıdır, yani UYA oluşumu ne kadar yüksek olursa pH'ı o kadar düşük olur (Peng ve diğ. 2013).

Şekil 5.3'teki giderek azalan UYA konsantrasyonları asitleşme safhasının tamamladığını ve metanlaşma safhasına geçildiğini göstermektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde 90 günlük işletme süresi boyunca Reaktör<sub>1</sub>'deki UYA konsantrasyonları Reaktör<sub>2</sub>'ye göre daha yüksektir. Bunun sebebi KOİ konsantrasyonlarından da anlaşıldığı üzere Reaktör<sub>1</sub>'de lignin ve selüloz içeriği yüksek olan ayçiçeği sapının fazla olması nedeni ile organiklerin parçalanma hızı daha yavaş gerçekleşmiş ve ortamda asit birikmesi meydana gelmiştir. 90 günlük işletme periyodu sonucunda UYA konsantrasyonları Reaktör<sub>1</sub> ve Reaktör<sub>2</sub>'de sırasıyla 1000 mg/l ve 170 mg/l'dir. Anaerobik biyoreaktörlerdeki UYA konsantrasyonlarının giderim verimleri hesaplandığında Reaktör<sub>1</sub>'de %84, Reaktör<sub>2</sub>'de ise %94'lük giderim verimi sağlanmıştır.

Kainthola ve diğ. (2019), gelişmiş metan üretimi için harici bir nitrojen kaynağı olarak pirinç samanı ve hidrilla verticillata'nın anaerobik birlikte çürümesini farklı C/N değerlerindeki etkileri araştırılmıştır. İşlemin başlangıcındaki UYA konsantrasyonu 800 ile 1100 mg/l arasında değişmiştir ve bu, hidrilla verticillata'nın (ortak substrat) değişken oranından büyük ölçüde etkilenmiştir. C/N oranı 15 için 3400 mg/l'ye kadar yükselmiş ve reaktörde birikerek prosesin başarısız olmasına neden olmuştur. Diğer oranlarda, UYA değeri önce maksimum değerine yükselmiş ve ardından sürekli azalmıştır. 14. günde, UYA'ların konsantrasyonu yaklaşık olarak 3500mg/l'dir.



Şekil 5.3: Biyoreaktör sızıntı suyu UYA konsantrasyonları değişimi

#### 5.1.4 Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı

Anaerobik reaktörlerde oluşan toplam gaz, organik atıklardan üretilir ve normalde %50 CH<sub>4</sub>, %45 CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve metan olmayan organik bileşikler dahil %5 diğer gazlardan oluşur (Themelis ve Ulloa 2007). Anaerobik koşullar altında atıkların ayrışması sırasında, organik madde mikrobiyal faaliyetler yoluyla biyogaza dönüştürülür (Venkiteshwaran ve diğ. 2016).

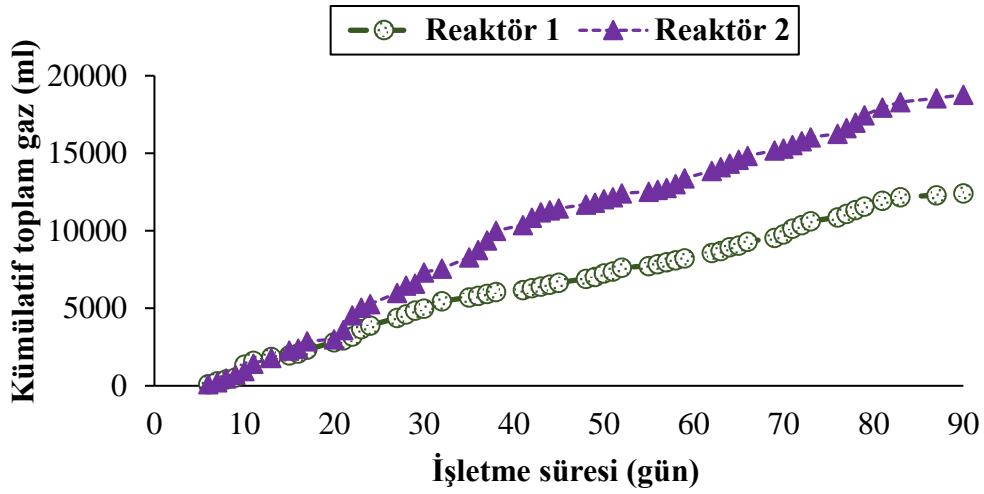
Anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif toplam gaz miktarı Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Kümülatif olarak hesaplanan toplam gaz miktarları 90 günlük işletme periyodunda sırasıyla Reaktör<sub>1</sub>'de 12,42 L ve Reaktör<sub>2</sub>'de 18,875 L olarak ölçülmüştür.

Reaktörlerde oluşan gaz miktarları kıyaslandığında Reaktör<sub>2</sub>'deki toplam gaz miktarı Reaktör<sub>1</sub>'e göre daha fazladır. Reaktör<sub>1</sub>'de selüloz ve lignin içeriği yüksek olan ayçiçeği sapı oranının fazla olması toplam gaz miktarını azaltmıştır. Özellikle anaerobik ortamda yüksek lignin ve selüloz içeriğine sahip atıkların zor parçalanması bunda en önemli etkidir. Parçalanma yavaş olduğu için toplam gaz oluşumu da yavaş gerçekleşmiştir.

Gu ve diğ. (2014), farklı aşı kaynaklarının pirinç samanı anaerobik çürümesi üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Substrat olarak atık pirinç samanı aşı olarak da

üç çürütülmüş gübre ve üç çamur olmak üzere 6 farklı aşı olarak uygulanmış ve etkileri kesikli reaktörlerde değerlendirilmiştir. Reaktörler 40 gün boyunca işletilmiştir. Sonuçlar, çürütülmüş gübrelerin çamurdan daha uygun olduğunu göstermiştir. Çürütülmüş gübrelerle aşılana reaktörler daha yüksek biyogaz üretimi ve lignoselüloz bozunması sağlanmıştır. Çürütülmüş gübrelerin daha iyi uyum sağlaması, daha yüksek selüloz ve ksilanaz aktiviteleri ve yeterli besin içeriği ile ilişkilidir. Her üç çürütülmüş gübre arasında en iyi etkiye mandıra gübresi sahiptir. Mandıra gübresi ile aşılana reaktörler 325,3 ml /g VS ile en yüksek biyogaz üretimi sağlanmıştır.

Literatürde yapılan bu çalışmada 40 günde oluşan biyogaz bizim çalışmamızdaki üretilen biyogaza kıyasla oldukça düşük sonuçlar elde edilmiştir. Pirinç samanının selüloz içeriği %34,3 ayçiçeği sapında ise %24,46'dır. Biyogaz üretiminde selüloz içeriğinin pirinç samanında daha yüksek olması biyogaz verimi üzerinde olumsuz etkilendiği yapılan çalışma ile ortaya konulmuştur.



Şekil 5.4: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı

### 5.1.5 Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi

Anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Çalışma periyodunun başlangıç kısımlarında ölçülen metan gazının hidrojen tüketen metan

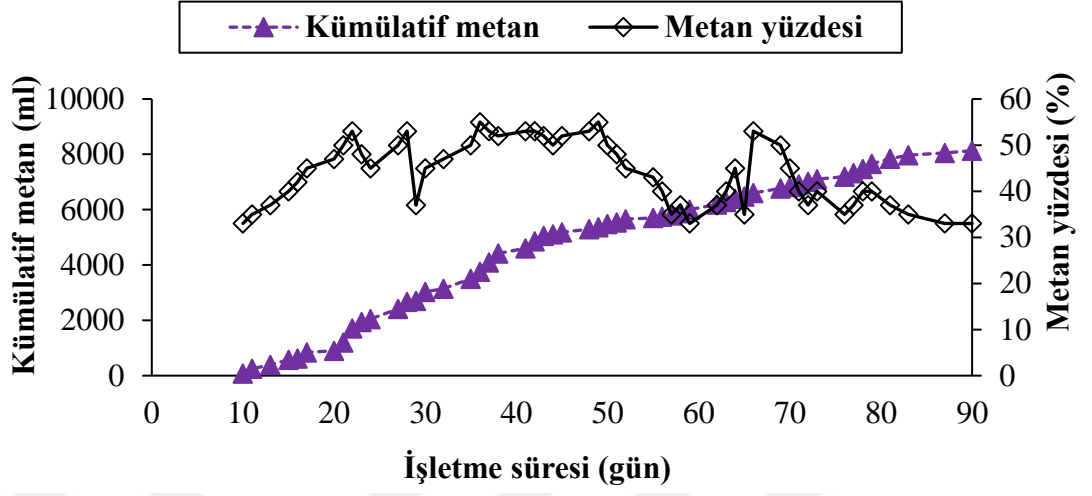
bakterileri tarafından üretildiği düşünülmektedir. 90 günlük işletme süresinde hesaplanan kümülatif metan miktarları ve sırasıyla Reaktör<sub>1</sub>'de 3,895 L, Reaktör<sub>2</sub>'de ise 8,13 L olarak ölçülmüştür. Reaktörlerdeki metan yüzdesi çalışma periyodu boyunca toplam gazın sırasıyla Reaktör<sub>1</sub>'de %34, Reaktör<sub>2</sub>'de %44'tür. Metan yüzdesi en yüksek Reaktör<sub>1</sub>'de %42 Reaktör<sub>2</sub>'de ise %55 olarak ölçülmüştür.

Lignoselülozik malzemeler yavaş bozunmaları ve dolayısıyla düşük metan verimi ile sınırlıdır. Lignoselülozik atığın parçalanabilirlik oranı sürecin hız kontrol adımı olduğu öne sürülen selülozun yavaş hidrolizi tarafından yönetilir (L. Sun ve diğ. 2015). Reaktör<sub>1</sub>'de selüloz içeriği %24,46 olan ayçiçeği sapının miktarının Reaktör<sub>2</sub>'ye göre daha fazla olmasına paralel olarak oluşan metan miktarı daha azdır. Reaktör<sub>2</sub>'deki gıda atıklarının fazla olması lignoselülozik biyokütleyle göre daha yüksek metan potansiyeline sahiptir (Scherzinger ve Kaltschmitt 2021). Bunun nedenleri, gıda atıklarının tipik olarak daha düşük miktarlarda zor parçalanabilen maddeler içermesidir. Ayrıca KOİ giderim verimlerine paralel olarak metan gazı miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Reaktör<sub>2</sub>'de KOİ giderim verimi Reaktör<sub>1</sub>'e göre daha yüksek olduğu için oluşan toplam gaz miktarı fazladır ve buna paralel olarak metan gazı miktarında artış olduğundan Reaktör<sub>2</sub>'de oluşan metan gazı daha fazladır.

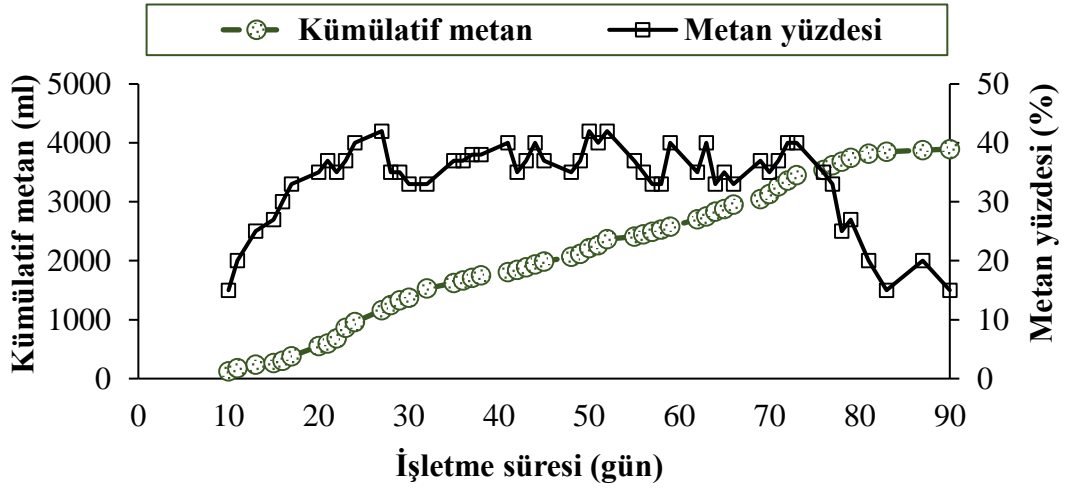
Dhamodharan ve diğ. (2015), organik atıkların aşısı olarak 5 farklı hayvan gübresi ile farklı F/M oralarında reaktörlerde anaerobik çürümelerini incelemiştir. Reaktörler 30 gün boyunca işletilmiştir. 30 günlük işletme periyodu sonucunda inek gübresi ile organik atığın anaerobik çürümemesinin, F/M oranı 2 olan reaktörde oluşan 3,47 L, domuz gübresinin aşısı olarak kullandığı F/M oranının 1,5'te tutulan reaktörde 3,36 L, keçi gübresinin aşısı olarak kullanıldığı F/M oranının 2 olan reaktörde 3,09 L, kanatlı gübresinin aşısı olarak kullanıldığı F/M oranının 1,5'te tutulduğu reaktörde 3,05 L ve gergadan gübresinin 1,5 F/M oranında 2,32 L kümülatif metan gazı ölçülmüştür.

Tyagi ve diğ. (2018), organik fraksiyonlu kentsel katı atıkların (OFMSW) ve inek gübresinin (CM) anaerobik birlikte çürümesinde daha yüksek metan üretimi ile sonuçlandığı ve daha yüksek kütle dönüşümü ve daha düşük ağırlık ve çürütülmüş atık hacmi ile sonuçlanan sinerjik etkileri teşvik ettiğinin bildirmiştir. OFMSW ve CM'yi 50:50 (VS:VS) oranında birlikte parçalayan termofilik bir ıslak çürütme

sisteminin performansı, OLR 3,6 kg TVS/m<sup>3</sup>d olduğunda sırasıyla 0,35 m<sup>3</sup>/kg TVS ve %54'lük metan verimi ve VS uzaklaştırmasına sahiptir.



Şekil 5.5: Reaktör<sub>1</sub>'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi



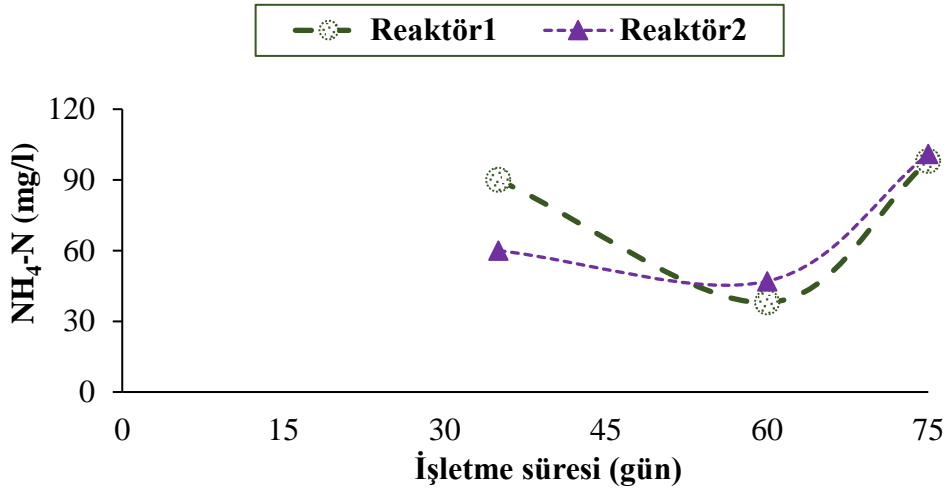
Şekil 5.6: Reaktör<sub>2</sub>'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

### 5.1.6 Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH<sub>4</sub>-N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi

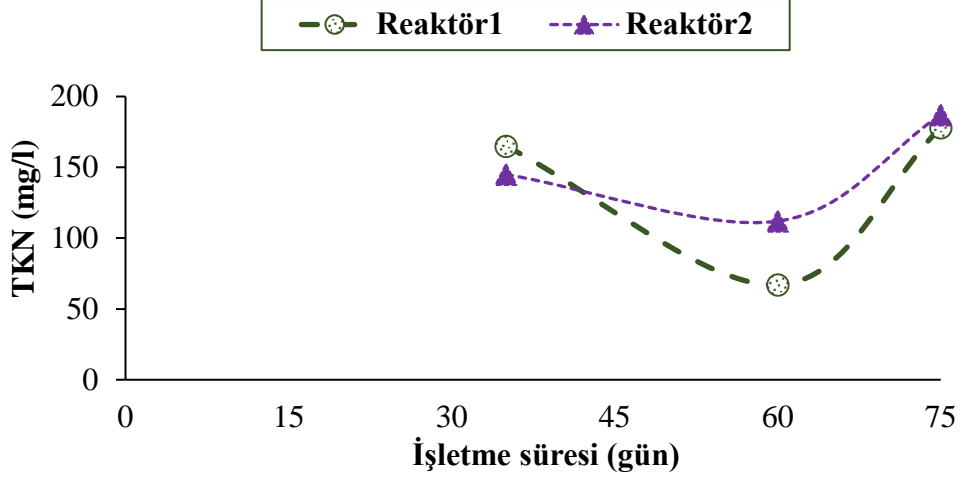
Organik maddelerin parçalanması sonucunda proteinler bozulduğunda, amonyum iyonları salınır. Bu amonyum iyonları, metanojenik bakterilerin güçlü inhibitörleridir (Schnürer ve Nordberg 2008).

Biyoreaktörlerin işletilmesi sürecinde 3 ayrı günde  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN konsantrasyonları ölçülmüştür. Biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki  $\text{NH}_4\text{-N}$  sonuçları Şekil 5.7’de ve TKN sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmiştir. 35. günde sızıntı suyu numunelerinde  $\text{NH}_4\text{-N}$  konsantrasyonları Reaktör<sub>1</sub>’de 90 mg/l Reaktör<sub>2</sub>’de 60 mg/l ve TKN konsantrasyonları ise Reaktör<sub>1</sub>’de 165mg/l Reaktör<sub>2</sub>’de 145 mg/l’dir.

Organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçmesiyle birlikte sistemdeki anaerobik mikroorganizmaların N ve aminoasit ihtiyaçlarında kullanılması nedeni ile 60. günde düşük konsantrasyonlarda  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN konsantrasyonları ölçülmüştür. 75. günde ise  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN konsantrasyonlarında yeniden artış gözlemlenmiştir. Konsantrasyonlardaki bu artış lignin ve selüloz içeriği yüksek ayçiçeği sapının parçalanmasının hala devam ettiğini göstermektedir. Buna ilaveten, reaktörlerin hepsinde sızıntı suyu resirkülasyonun sürekli olarak yapılması da bu artış üzerine etkilidir. TKN ve  $\text{NH}_4\text{-N}$  konsantrasyonları inhibe edici seviyelere ulaşmamıştır.



Şekil 5.7: Biyoreaktör sızıntı suyu  $\text{NH}_4\text{-N}$  konsantrasyonları değişimi



Şekil 5.8: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi

### 5.1.7 Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ<sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi

Anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyu örneklerindeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Biyoreaktörlerin işletim süresince 5 ayrı günde BOİ<sub>5</sub> ölçümleri yapılmıştır. Başlangıç BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör<sub>1</sub> ve Reaktör<sub>2</sub>’de sırasıyla 4275 mg/l ve 3585 mg/l’dir. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranı reaktörlerde stabilizasyonunun göstergesi olup BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranı başlangıçta Reaktör<sub>1</sub>’de 0,16 ve Reaktör<sub>2</sub>’de 0,18’dir. 0,02 ile 0,13 arasındaki BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranı düşük bir biyolojik parçalanabilirlik anlamına gelir ve zor ayrışabilen organik bileşenlerin fazla olduğunu gösterir (Sekman ve diğ. 2011).

İşletmenin 34. 45. ve 59. günlerinde reaktörlerdeki organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçmesiyle birlikte BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranlarında artış gözlemlenmiştir. 73. günde ise ortamda bulunan organik maddelerin metan bakterileri tarafından tüketilmesi sonucunda BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranlarında azalma gözlemlenmiştir. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları ise Reaktör<sub>1</sub>’de 0,22 Reaktör<sub>2</sub>’de 0,2’dir. Biyolojik parçalanabilirlik ile lignin içeriği arasında;

$$BF = 0,83 - (0,028 \times \text{Lignin } \%VS) \quad (5.1)$$

şeklinde (5.1) bir ilişki bulunmaktadır (Chandler ve Jewell 1980).

Bu eşitlikte,

BF; biyolojik olarak parçalanabilen kısım

0,83-0,028; empirik katsayılar

Lignin %VS; uçucu katıların yüzdesi olarak lignin içeriğidir.

Lignin içeriği yüksek ayçiçeği sapı atıklarının reaktörlere yüklenmesi neticesinde düşük BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları görülmektedir. BOİ<sub>5</sub> giderim verimleri hesaplandığında Reaktör<sub>1</sub>'de %76, Reaktör<sub>2</sub>'de %92'dir.

**Tablo 5.1:** Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi

	Reaktör 1					Reaktör 2				
	20.gün	34.gün	45.gün	59.gün	73.gün	20.gün	34.gün	45.gün	59.gün	73.gün
BOİ <sub>5</sub> (mg/l)	4275	5200	5376	3354	1224	4978	4538	2978	1345	357
KOİ (mg/l)	26714	21669	16291	9315	5565	19912	12965	8050	4075	1785
BOİ <sub>5</sub> /KOİ	0,16	0,24	0,33	0,36	0,22	0,25	0,35	0,37	0,33	0,2

### 5.1.8 Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi

Lignoselülozik biyokütlenin biyobozunurluğu, lignin içeriğine, selüloz ve hemiselüloz içeriğine, selüloz kristalliliğine, enzimatik reaksiyonlar için yüzey alanı mevcudiyetine ve ligninin yapısal özelliğine bağlıdır. Lignoselülozik biyokütlenin sınırlı hidroliz hızı, parçalamada sınırlayıcı bir faktör olarak kabul edilmiştir (Ghaffar ve Fan 2013).

Tablo 5.2'de biyoreaktörler için kullanılan atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce ve işletme tamamlandıktan sonra su içeriği ve organik madde yüzdeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre anaerobik olarak işletilen reaktörlerde sırasıyla Reaktör<sub>1</sub>'de %43, Reaktör<sub>2</sub>'de %52 organik madde giderimi sağlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre organik fraksiyonlu evsel atıkların lignin ve selüloz içeriği yüksek olan ayçiçeği sapının biyobozunabilirliği üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

**Tablo 5.2:** Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi

	Reaktör <sub>1</sub>		Reaktör <sub>2</sub>	
	İşletme öncesi	İşletme sonrası	İşletme öncesi	İşletme sonrası
<b>Su Muhtevası (%)</b>	71	87	76	88
<b>Organik Madde (%)</b>	82	47	89	43

## 5.2 Ayçiçeği Sapının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması

Ayçiçeği sapı, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör A<sub>1</sub>'de %20 evsel + %80 ayçiçeği sapı oranında ve Reaktör B<sub>1</sub>'de ise %100 ayçiçeği olacak şekilde karıştırılarak laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanmaya bırakılmıştır. Katı atıkta çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca ayçiçeği sapında lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyunda ise KOİ, pH, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları çalışma periyodu boyunca ölçülmüştür. Bunların yanı sıra reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı ölçümü de yapılmıştır.

### 5.2.1 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Değişimleri

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 90 günlük işletme periyodu boyunca oluşan sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere ait sızıntı suyu örneklerinde başlangıç KOİ konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla; 10181 mg/l ve 8777 mg/l'dir. 11. gündeki KOİ konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla; 25763 mg/l ve 22327 mg/l'dir. Biyoreaktörlerdeki sızıntı suyunda KOİ konsantrasyonları 14. günden itibaren azalma gözlemlenmiştir. 14. gündeki bu konsantrasyonlar Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla 23287 mg/l ve 18622 mg/l'dir. Havalandırma işlemi işletme periyodunun ilk 41 günü

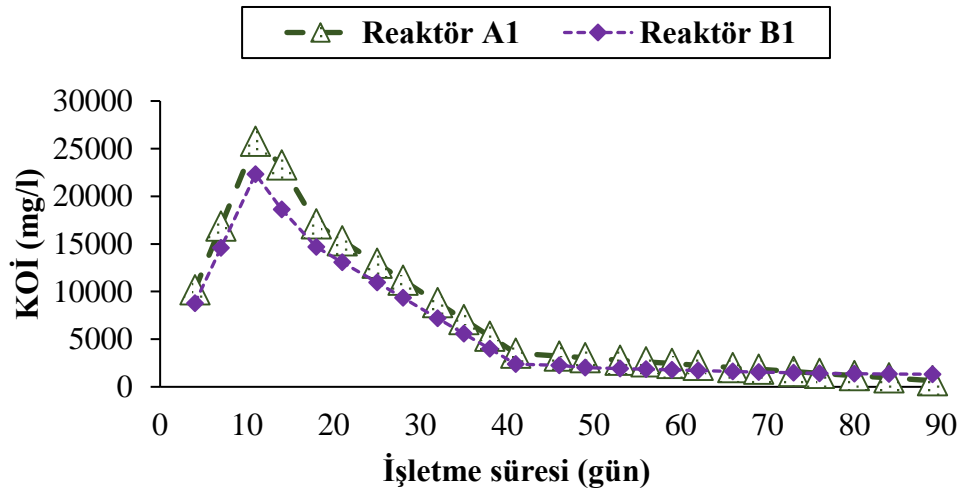
gerçekleştirilmiştir. 41. gündeki KOİ konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla 3526 mg/l ve 2378 mg/l'dir. Anaerobik ve semi-aerobik / anaerobik işletme koşulları kıyaslandığında sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde daha hızlı bir şekilde düşmeye başlamıştır. Bunun nedeni, aerobik prosesin anaerobik prosese göre daha hızlı olmasıdır. Bu süreç hızlı gerçekleştiğinden ortamda asit birikiminin daha az olmasından dolayı pH değerlerindeki düşüş miktarı anaerobik sistemlere göre daha azdır. Bu sayede reaktöre yüklenen organik atıklar parçalanıp daha hızlı bir şekilde sızıntı suyuna geçmiş ve daha kısa sürelerde stabilizasyon sağlanmıştır. 41. günden itibaren semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörler metan üretimi amacı ile anaerobik olarak işletilmiş ve KOİ konsantrasyonlarında daha yavaş bir azalma gözlemlenmiştir.

Jun ve diğ. (2007), Reaktör A sızıntı suyu geri devirli havalandırmaz, Reaktör B sızıntı suyu geri devirli ve aralıklı havalandırmalı, Reaktör C ise sızıntı suyu geri devirli, havalandırmalı ve aktif çamur ilaveli olmak üzere 3 ayrı reaktör sistemi 35 gün boyunca işletilmiştir. İşletilen reaktörlerde ilk 5 gün boyunca KOİ birikimi meydana gelmiştir. A, B ve C reaktörlerinin KOİ değerleri, ilk ayarlama aşamasında sırasıyla 1070, 1209 ve 1321'den 1502, 1731 ve 1654 mg/l'ye yükselmiştir. 35. Günde KOİ konsantrasyonları, A, B ve C reaktörleri için sırasıyla 450, 246 ve 278 mg/l gibi düşük değerlere ulaşmıştır. Aralıklı havalandırma yapılan bu çalışmadaki Reaktör C'ye benzer bir şekilde reaktörlerin 41 günlük semi-aerobik olarak işletilen kısmında KOİ giderim verimlerinin benzer bir şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

Toptaş ve Yay (2017), kesikli hava verilerek işlettikleri reaktörde ilk 38 gün KOİ konsantrasyonlarında yükselme görülmüş ve en yüksek değer 29800 mg/l olarak ölçülmüştür. 38.günden itibaren hızlı bir düşüş olmuştur. 245 gün boyunca çalıştırılan kesikli reaktörde çalışma sonunda ölçülmüş olan KOİ konsantrasyonu 396 mg/l'dir. Buradan sisteme verilen oksijenin daha hızlı ayrıştırma etkisinin olduğu görülmektedir. Bu çalışmaya benzer bir şekilde bizim çalışmamızda da 90 günlük işletme periyodu sonucunda Reaktör A<sub>1</sub>'deki KOİ konsantrasyonu 651 mg/l, Reaktör B<sub>1</sub>'deki KOİ konsantrasyonu ise 1326 mg/l olarak ölçülmüştür. KOİ giderim verimleri hesaplandığında Reaktör A<sub>1</sub>'de KOİ giderim verimi %97, Reaktör B<sub>1</sub>'de ise bu değer %94'tür.

Anaerobik biyoreaktörlerden Reaktör<sub>1</sub> ve semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerden Reaktör A<sub>1</sub>'de aynı karışım oranlarında atık olmasında rağmen Reaktör A<sub>1</sub>'de aerobik prosesin avantajlarından biri olan hidroliz safhası anaerobik sisteme göre daha hızlı ve daha kısa sürede gerçekleştiği için atıkların bünyesinde bulunan organik maddeler daha kısa sürede sızıntı suyuna geçmiş ve daha yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. Reaktör B<sub>1</sub>'de ise %100 ayçiçeği sapı olmasına rağmen iki reaktörde de kısa sürelerde daha hızlı oranlarda KOİ düşüşü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi aerobik prosesin anaerobik procesten daha hızlı olmasıdır.

Uzun bir çalışma süresi sonunda ölçülen KOİ konsantrasyonları lignin ve selüloz içeriği yüksek atıkların anaerobik prosese göre semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında daha iyi parçalandığını göstermektedir.



Şekil 5.9: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi

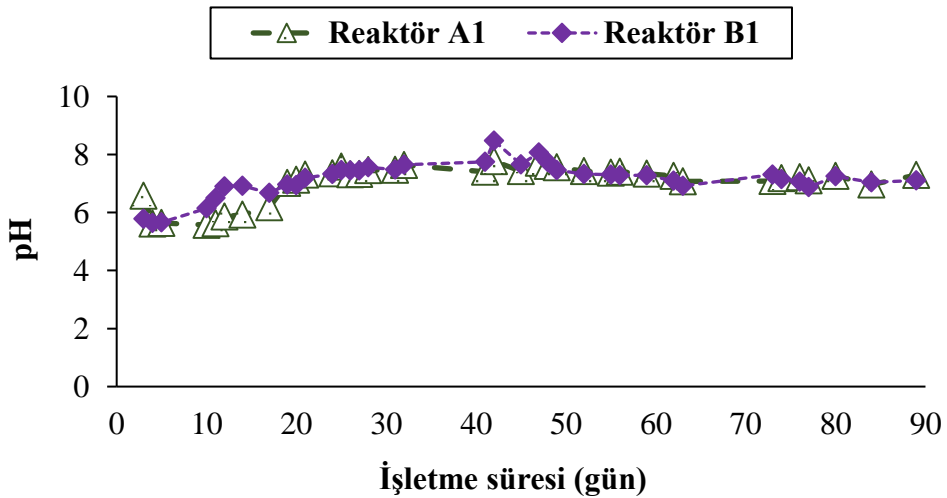
### 5.2.2 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri

Mezofilik sistemlerde metan bakterileri için optimum pH aralığı 6,5-8,0 arasındadır. pH 6,0'ın altına ve 8,3'ün üstüne çıktığı durumlarda proses ciddi şekilde sınırlandırılmış olur (Teodorita ve diğ. 2008).

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki pH değişimleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde pH değerlerinde 10. günden itibaren artış gözlemlenmiştir. pH değerlerindeki bu artış reaktörlerde yapılan havalandırma etkisiyle hidroliz ve asitleşme safhasının daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Cossu ve diğ. (2016), ön havalandırmanın sonraki anaerobik fazda pH artışı üzerindeki faydalı etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Reaktörlerde en yüksek pH değerleri 42. günde ölçülmüştür ve bu değerler Reaktör A<sub>1</sub>'de 7,77 ve Reaktör B<sub>1</sub>'de 8,47'dir. 90 günlük işletme periyodu boyunca reaktörlerde pH değerleri sırasıyla Reaktör A<sub>1</sub>'de 5,57-7,77 ve Reaktör B<sub>1</sub>'de 5,64-8,47 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki pH değerleri anaerobik işletme koşullarındaki pH değerlerinden daha yüksektir. Bunun sebebi reaktörlere verilen kesikli havanın hidroliz ve asitleşme fazının daha kısa sürelerde gerçekleşmesi ve reaktörlerin metanlaşma safhasına daha hızlı geçmesidir.



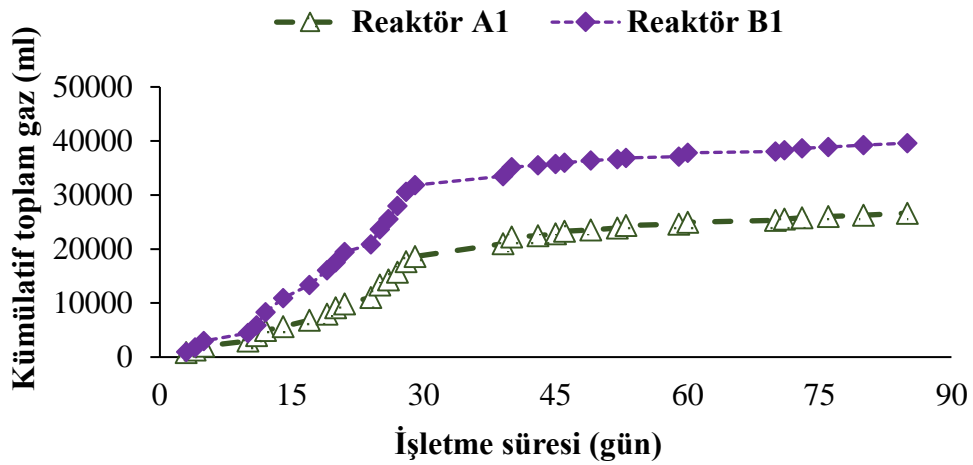
Şekil 5.10: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimleri

### 5.2.3 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif toplam gaz miktarı Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Reaktörlerin işletilmesinin

ilk 41 gününde verilen kesikli hava nedeniyle pH değerleri anaerobik sisteme göre daha yüksek ölçülmüştür. Reaktörlerde oluşan gaz miktarları karşılaştırıldığında Reaktör B<sub>1</sub>'de toplam gaz miktarı Reaktör A<sub>1</sub>'den oldukça yüksektir. Reaktör B<sub>1</sub>'de %100 ayçiçeği sapı olmasına rağmen pH değerleri Reaktör A<sub>1</sub>'e göre daha yüksek olduğundan pH değerlerine paralel olarak oluşan gaz miktarı Reaktör B<sub>1</sub>'de daha fazladır.

90 günlük işletme periyodu boyunca kümülatif olarak hesaplanan toplam gaz miktarları Reaktör A<sub>1</sub>'de 26,64 L, Reaktör B<sub>1</sub>'de 39,6 L olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ölçülen toplam gaz miktarı bir önceki anaerobik biyoreaktörde yapılan çalışmaya göre daha yüksektir. Lignin ve selüloz içeriği yüksek olan ayçiçeği sapının semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanması anaerobik işletme koşullarına göre daha hızlı gerçekleştiği ve pH değerlerinin kesikli hava sayesinde yüksek olması daha fazla gaz miktarı oluşmasında neden olmuştur.



Şekil 5.11: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı

#### 5.2.4 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi

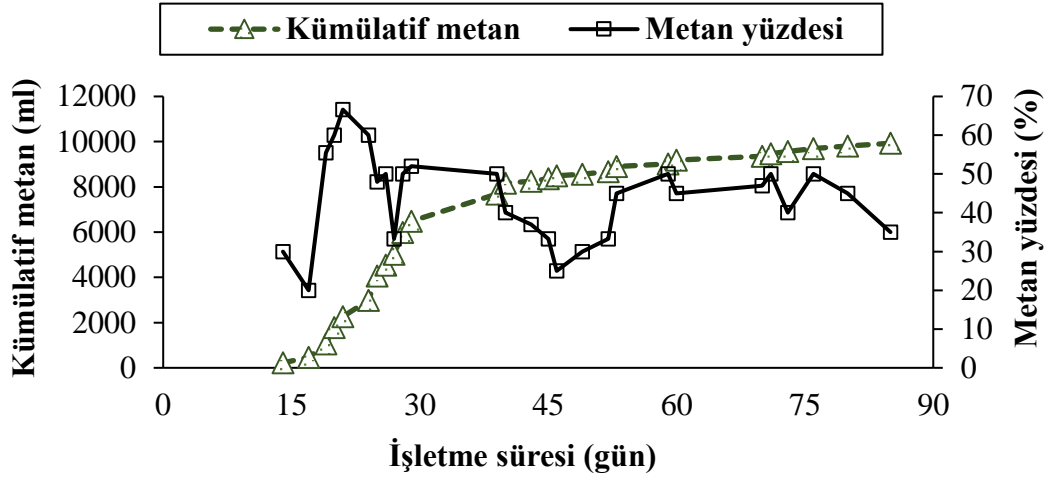
Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif metan gazı miktarı ve yüzdesi Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Reaktörlere verilen hava nedeniyle reaktörlerde anaerobik sisteme göre yüksek oranda metan gazı oluştuğu gözlemlenmiştir.

Geleneksel olarak, anaerobik mikroorganizmalar üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirmek için anaerobik çürüme sistemlerinde oksijen veya hava maruziyetinden kaçınılır. Bununla birlikte, son zamanlarda metanojenezin oksijenli tatlı su ve toprak gibi anaerobik ortamların dışında da meydana geldiği bulunmuştur (Angle ve diğ. 2017). Nguyen ve Khanal ( 2018), az miktarda oksijen / havaya (mikro havalandırma) maruz kalmanın, hidrolizi arttırmada, metan verimini iyileştirmede, işlemi stabilize etmede ve diğerleri arasında hidrojen sülfürü temizlemede anaerobik çürütme işlemine fayda sağladığı bildirilmiştir.

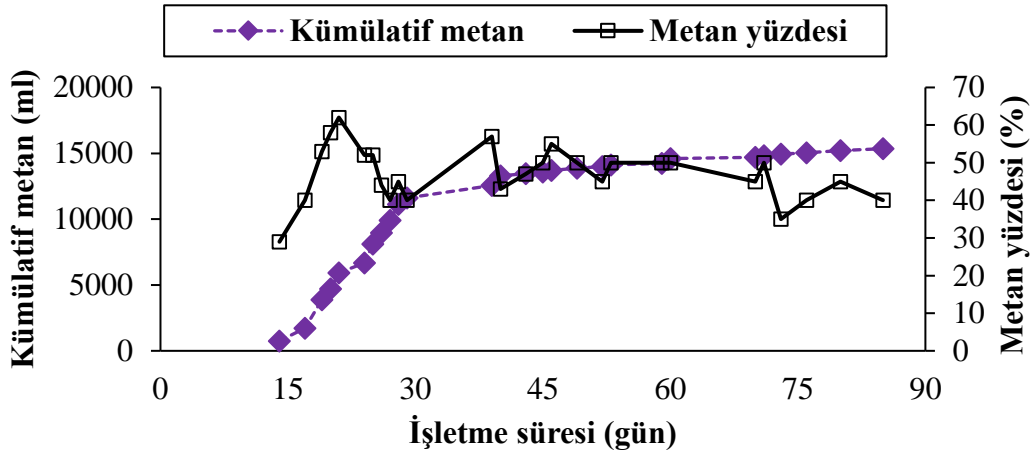
Reaktörde havalandırma işlemi tamamlanıp anaerobik işletmeye devam edildiğinde aerobik kısma göre daha az metan gazı oluşmuştur. Aerobik kısımda metan bakterileri ortamdaki organik maddeleri tüketmiş ve anaerobik kısma geçildiğinde ortamda daha az organik madde olmasından dolayı aerobik kısma göre daha az metan gazı oluşmuştur.

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerdeki kümülatif olarak hesaplanan metan miktarları sırasıyla Reaktör A<sub>1</sub>'de 9,929 L ve Reaktör B<sub>1</sub>'de 15,351 L'dir. Reaktörlerdeki metan yüzdesi çalışma periyodu boyunca toplam gazın sırasıyla Reaktör A<sub>1</sub>'de %44, Reaktör B<sub>1</sub>'de %47'dir. Metan yüzdesi en yüksek 21. günde Reaktör A<sub>1</sub>'de %66,6 Reaktör B<sub>1</sub>'de ise %62 olarak ölçülmüştür.

Anaerobik işletme ile kıyaslandığında semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında oluşan metan gazı miktarı anaerobik sisteme göre daha fazla oluşmuştur. Bunun sebebi semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerin 41 gün boyunca kesikli hava verilerek havalandırması hidroliz ve asitleşme fazının daha kısa sürelerde tamamlanması ve ardından metanlaşma fazına geçişin daha hızlı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.12: Reaktör A<sub>1</sub>'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi



Şekil 5.13: Reaktör B<sub>1</sub>'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

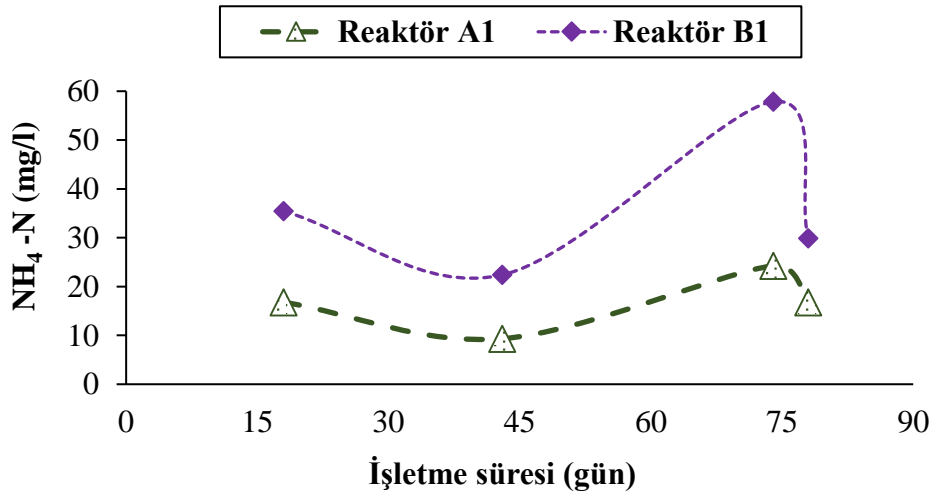
### 5.2.5 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH<sub>4</sub>-N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki NH<sub>4</sub>-N ve TKN sonuçları Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir. İşletmenin ilk 41 günü reaktörler kesikli olarak havalandırıldığı için TKN ve NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Kesikli havalandırmanın ardından sistem anaerobik olarak işletildiğinde NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. 74. günde NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de

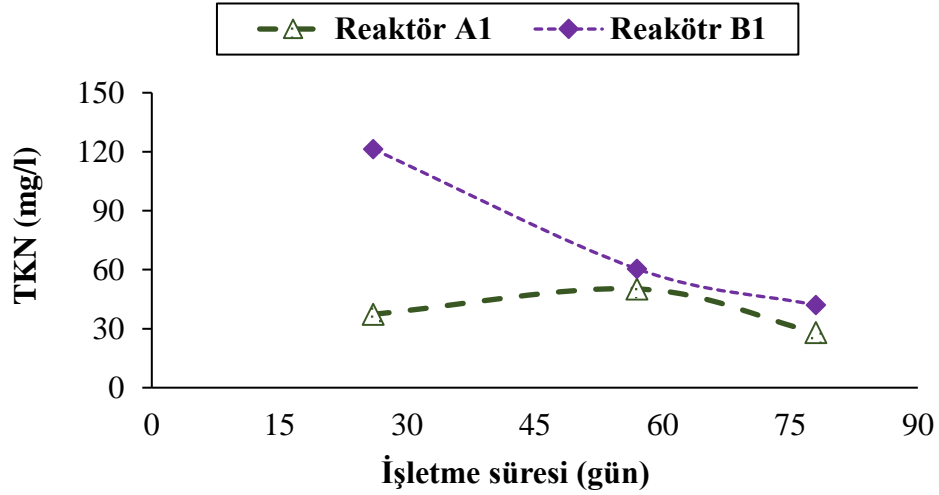
sırasıyla 24,26 mg/l ve 57,86 mg/l'dir. 78. günde TKN konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla 28 mg/l ve 42 mg/l, NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonları ise 16,8 mg/l ve 29,86 mg/l'dir.

Nag ve diğ. (2016), aralıklı havalandırma kullanılarak aerobik-anaerobik depolama yöntemini değerlendirilmiştir. Amonyum azotunun kütlesi, havanın sıyırılması ve serbest amonyağın çıkarılması nedeniyle, başlangıçtaki yüksek değerlerinden keskin bir şekilde azalmıştır. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> konsantrasyonlarında gözlenen düşüş, döngüsel / aralıklı havalandırma tarafından oluşturulan hibrit koşulların toplam nitrojen, özellikle amonyum konsantrasyonlarının azaltılması için uygun olduğunu gösteren önceki çalışmaların bulgularıyla uyumludur. Deney sonunda aerobik-anaerobik reaktörlerde amonyum azotunun gideriminin aerobik reaktöre göre biraz daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Ayçiçeği sapının anaerobik işletme koşulları altındaki NH<sub>4</sub>-N ve TKN değerleri semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındakine göre oldukça yüksektir. Literatürde yapılan çalışmalar, bir yarı aerobik biyoreaktör depolama sahasının sadece depolama sahası stabilizasyon sürecini hızlandırıp sızıntı suyundaki organik madde konsantrasyonunu azaltamayacağını, aynı zamanda sızıntı suyundaki amonyak konsantrasyonunu da azaltabileceğini göstermektedir (Y. Sun ve diğ. 2011; Huang ve diğ. 2008).



Şekil 5.14: Biyoreaktör sızıntı suyu NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonları değişimi



Şekil 5.15: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi

### 5.2.6 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ<sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerdeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonlarındaki değişimi Şekil Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Biyoreaktörlerin işletim süresince 4 ayrı günde BOİ<sub>5</sub> ölçümleri yapılmıştır. 21. gündeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla 5058 mg/l ve 3923 mg/l ve BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları Reaktör A<sub>1</sub>'de 0,33 Reaktör B<sub>1</sub>'de ise 0,3'tür. Bu değerler anaerobik sistemdeki başlangıç BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranına göre daha yüksektir. Reaktörlere kesikli olarak verilen hava sayesinde organik maddelerin parçalanıp sızıntı suyuna geçmesi anaerobik sisteme göre daha önce başladığı gözlemlenmiştir. 38.günde ise BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları Reaktör A<sub>1</sub>'de 0,4 Reaktör B<sub>1</sub>'de ise 0,35'e yükselmesi organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçtiğinin bir göstergesidir. İşletmenin devam eden günlerinde BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranı azalarak devam etmiştir. 80. gündeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla 154 mg/l ve 262 mg/l'dir. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları ise Reaktör A<sub>1</sub>'de 0,13 Reaktör B<sub>1</sub>'de 0,19'dur.

Lignin içeriği yüksek ayçiçeği sapı atıklarının reaktörlere yüklenmesi neticesinde yapılan kesikli havalandırma sayesinde organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçmesi ile anaerobik işletme koşullarına göre daha yüksek BOİ<sub>5</sub> /

KOİ oranları görülmektedir. BOİ<sub>5</sub> giderim verimleri hesaplandığında Reaktör A<sub>1</sub>'de %97 Reaktör B<sub>1</sub>'de %93'tür.

**Tablo 5.3:** Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi

	Reaktör A <sub>1</sub>				Reaktör B <sub>1</sub>			
	21.gün	38.gün	56.gün	80.gün	21.gün	38.gün	56.gün	80.gün
BOİ <sub>5</sub> (mg/l)	5058	2119	394	154	3923	1394	462	262
KOİ (mg/l)	15328	5299	2626	1186	13078	3983	1848	1377
BOİ <sub>5</sub> /KOİ	0,33	0,4	0,15	0,13	0,3	0,35	0,25	0,19

### 5.2.7 Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi

Tablo 5.4'te biyoreaktörler için kullanılan atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce ve işletme tamamlandıktan sonra su içeriği ve organik madde yüzdeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerde sırasıyla Reaktör A<sub>1</sub>'de %60 Reaktör B<sub>1</sub>'de ise %58 organik madde giderimi sağlanmıştır. Reaktör A<sub>1</sub>'de organik fraksiyonlu evsel katı atık ligin selüloz içeriği yüksek ayçiçeği sapının parçalanmasında etkili olmuştur ve Reaktör B<sub>1</sub>'e göre daha fazla organik madde giderim verimi sağlanmıştır.

Ayrıca reaktörlere kesikli olarak hava verilmesi organik madde giderimi üzerinde olumlu etki yaratmıştır. Bu durum, çalışmanın bir önceki bölümde elde edilen %43 ve %52 organik madde giderme veriminden görülmektedir. Kesikli hava verilmesi organik madde giderme verimini %58'lerin üzerinde çıkarmıştır.

**Tablo 5.4:** Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi

	Reaktör A <sub>1</sub>		Reaktör B <sub>1</sub>	
	İşletme öncesi	İşletme sonrası	İşletme öncesi	İşletme sonrası
<b>Su Muhtevası (%)</b>	26	87	12	88
<b>Organik Madde (%)</b>	88	35	85	36

### **5.3 Kekik Atığının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması**

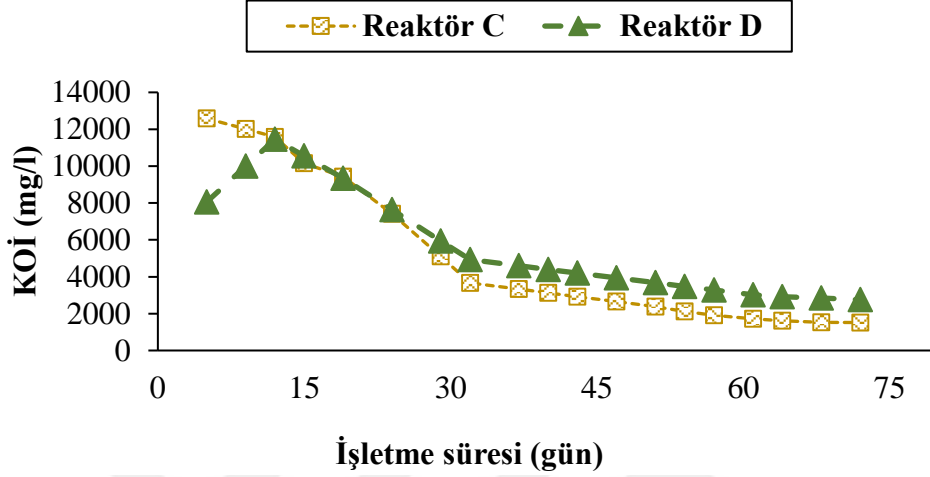
Kekik atığı, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör C'de %20 evsel + %80 kekik atığı oranında ve Reaktör D'de ise %100 kekik atığı olacak şekilde karıştırılarak laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanmaya bırakılmıştır. Katı atıkta çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kekik atığında lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyunda ise KOİ, pH, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları çalışma periyodu boyunca ölçülmüştür. Bunların yanı sıra reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı da ölçülmüştür.

#### **5.3.1 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Değişimleri**

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 72 günlük işletme periyodu boyunca oluşan sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları Şekil 5.16'da gösterilmektedir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere ait sızıntı suyu örneklerinde başlangıç KOİ konsantrasyonları Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla; 12581 mg/l ve 7052 mg/l'dir. Havalandırma işlemi işletme periyodunun ilk 32 günü gerçekleştirilmiştir. 32. gündeki KOİ konsantrasyonları Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla 3659 mg/l ve 4926 mg/l'dir. Biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyu örneklerinde Reaktör C'de KOİ değeri 5.günden itibaren azalma gözlemlenirken Reaktör D'de 15. güne kadar KOİ değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Çalışma periyodunun 32. gününden itibaren sistemin metan üretmesi amacı ile anaerobik olarak işletilmiştir. Şekil 5.18 incelendiğinde anaerobik koşullara geçildiği zamandan itibaren KOİ konsantrasyonlarında daha yavaş bir düşüş gözlemlenmiştir. 72 günlük semi-aerobik / anaerobik işletme sonucunda KOİ konsantrasyonları Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla; 1516 mg/l ve 2751 mg/l KOİ giderim verimleri ise %87 ve %75'tir.

Ayçiçeği sapı örneği ile kıyaslandığında kekik atığında daha yüksek lignin ve selüloz içeriğinden dolayı kekiğin organik olarak parçalanması daha zor olduğu için

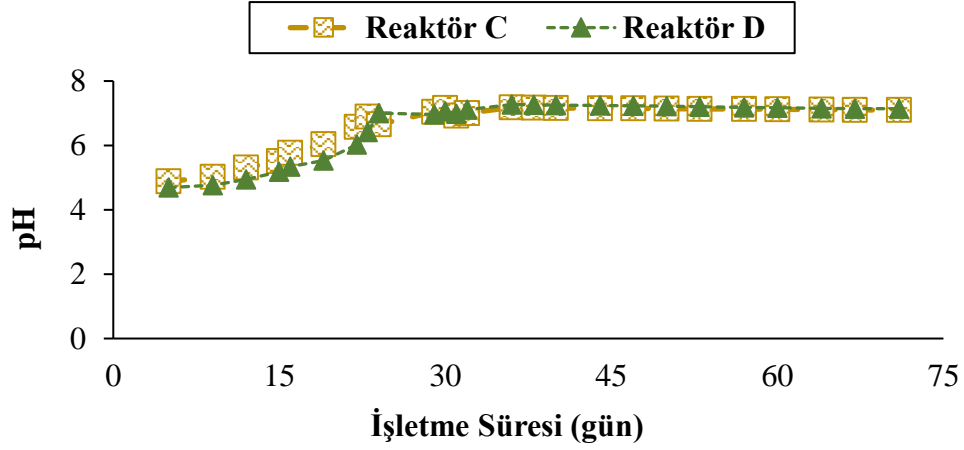
daha düşük KOİ giderim verimi sağlanmıştır. 72 günlük işletme süresi sonucunda semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında yapılan analizler sırasında alınan sızıntı suyunun gözle görülür şekilde yağlı bir görüntüsünün oluşu bu yağlılığın organik maddelerin parçalanması üzerinde olumsuz bir etki yaratabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.16: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi

### 5.3.2 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki pH değişimleri Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Şekil 5.17 incelendiğinde pH değerlerinde verilen kesikli hava sayesinde 5. günden itibaren artış gözlemlenmiştir. Ölçülen en yüksek pH değerleri 36. günde Reaktör C’de 7,18 Reaktör D’de ise 7,27’dir. İşletmenin devam eden günlerinde reaktörlere verilen kesikli havalandırma işlemi tamamlanıp anaerobik olarak işletilmeye başlanmıştır ve pH değerleri devam eden günlerde azaldığı gözlemlenmiştir. 72 günlük işletme periyodu boyunca reaktörlerde pH değerleri sırasıyla Reaktör C’de 4,88-7,18 Reaktör D’de ise 4,69-7,27 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Kekik atığı ayçiçeği sapına göre daha düşük pH değerlerine sahiptir. Bunun sebebi kekiğin antimikrobiyal özelliğe sahip olması ve mikroorganizmalar üzerinde olumsuz etkiye sebep olması nedeniyle ayçiçeği sapına göre daha düşük pH değerleri gözlemlenmiştir.

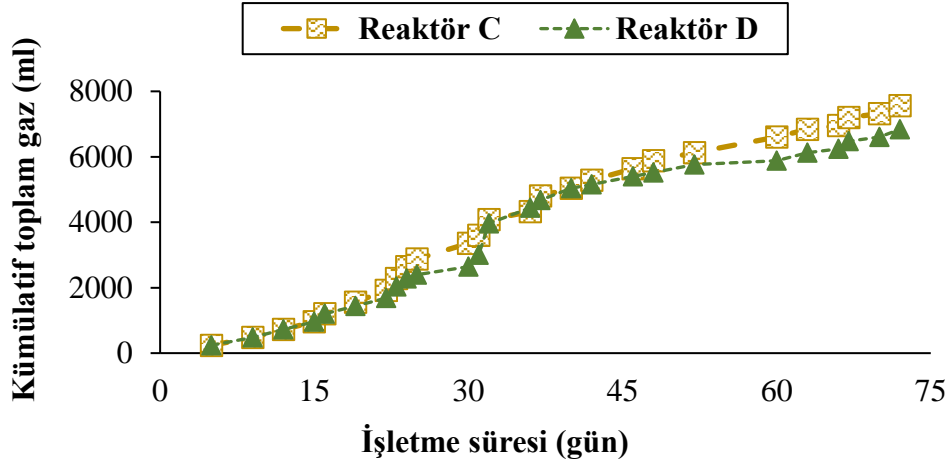


Şekil 5.17: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi

### 5.3.3 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı

Tarımsal atıkların lignoselülozik doğası ve yüksek C/N oranı, biyogaz üretim verimliliğini önemli ölçüde etkileyen önemli engellerdir (Sambusiti ve diğ. 2012). Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif toplam gaz miktarı Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Reaktörlerde oluşan gaz miktarları karşılaştırıldığında Reaktör C’de toplam gaz miktarı Reaktör D’den daha yüksektir. Bunun sebebi Reaktör C’de organik fraksiyonlu evsel atıkların kekik atığı ile karıştırılması sonucunda organik maddelerin parçalanıp sızıntı suyuna geçmesi toplam gaz oluşumdaki olumlu etkiye neden olmuştur. 72 günlük işletme periyodu boyunca oluşan kümülatif toplam gaz miktarları Reaktör C’de 7,56 L, Reaktör D’de 6,84 L gaz ölçülmüştür.

Kekik atığı %26,64 lignin ve ayçiçeği sapı ise %17,23’lük lignin içeriğine sahiptir. Chiumenti ve diğ. (2018) tarafından bildirildiği gibi, ayçiçeği sapına göre daha yüksek bir lignin içeriğine sahip olduğu için düşük biyogaz verimi ile sonuçlanmıştır.



Şekil 5.18: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı

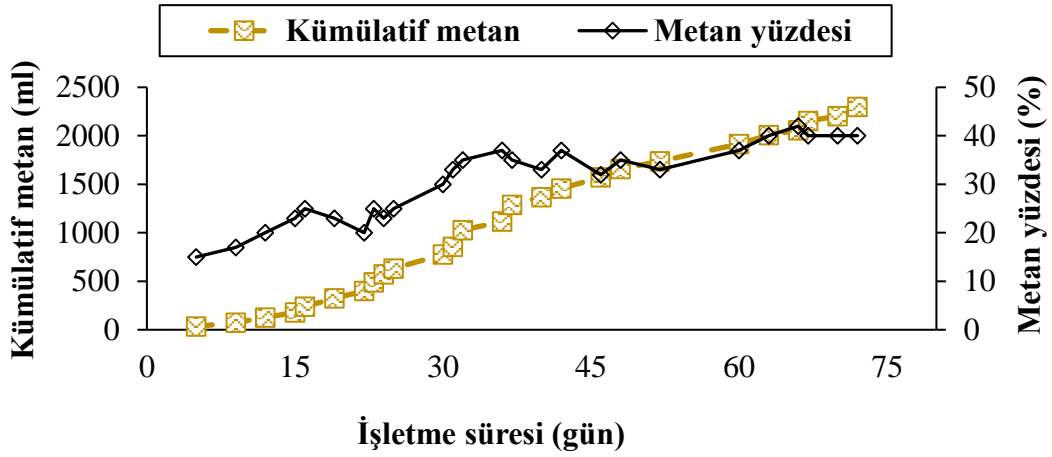
#### 5.3.4 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif metan gazı miktarı ve yüzdesi Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerdeki kümülatif olarak hesaplanan metan miktarları sırasıyla Reaktör C’de 2,3 L ve Reaktör D’de 1,968 L gaz ölçülmüştür. Reaktörlerdeki metan yüzdesi çalışma periyodu boyunca Reaktör C’de %30,5 Reaktör D’de %27,5’i metan gazıdır. Anaerobik ortamda selüloz ve lignin içeren atıkların zor parçalanması neticesinde metan yüzdesi düşük olabilir. Ancak başlangıçta reaktörlerin havalandırılması parçalanmayı başlatmıştır. Gaz miktarlarının artmasının sebebi budur.

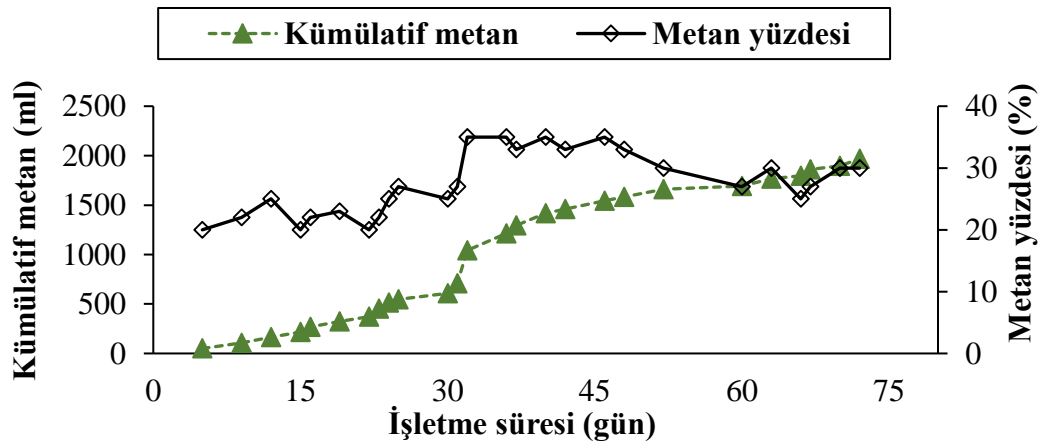
Avcı ve diğ. (2014), ruminant beslemede yaygın olarak kullanılan bazı kaba yemlere; (mısır silajı, yonca kuru otu, çayır kuru otu ve buğday samanı) farklı seviyelerde (%0, %0,5, %1,0, %1,5, %2,0 ve %2,5) ilave edilen okaliptüs (*Eucalyptus camaldulensis*) yaprağının in vitro metan gazı üretimi üzerine etkisini belirlemek amacıyla çalışma yapmışlardır. Farklı seviyelerde okaliptüs yaprağı ilave edilmiş deneme yemleri in vitro gaz tekniği ile 24 saatlik inkübasyona bırakılmışlardır. İn vitro gaz üretim tekniği ile 24. saatte oluşan toplam gaz miktarı bilgisayar destekli metan gazı ölçüm cihazına özel bir düzenele enjekte edilerek

metan ve karbondioksit gazı düzeyleri ölçülmüştür. Tüm yem maddeleri için en düşük metan gazı %2,5 düzeyinde okalıptüs yaprağı ilave edilen uygulamadan elde edilmiştir. Literatürde yapılan bu çalışmada kullanılan okalıptüs yaprağı da bizim çalışmamızda kullandığımız kekik atığında olduğu gibi antimikrobiyal özelliğinden dolayı metan bakterileri üzerinde olumsuz etkisinden dolayı düşük metan verimleri elde edilmiştir.

Ayçiçeği sapı ve kekik atığı kıyaslandığında oluşan metan gazı miktarı ayçiçeği sapına göre çok azdır. Kekik atığının ayçiçeği sapına göre daha yüksek lignin ve selüloz içeriğine sahip olması ve kekiğin yapısı itibariyle antimikrobiyal bir özelliğe sahip olması metan bakterileri üzerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmış olabileceğinden sistem olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 5.19: Reaktör C'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

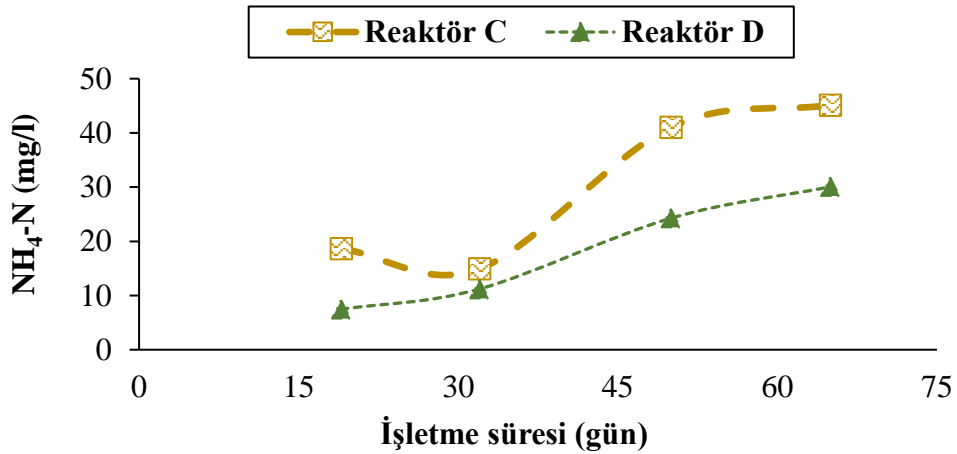


Şekil 5.20: Reaktör D'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

### 5.3.5 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH<sub>4</sub>-N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki NH<sub>4</sub>-N ve TKN sonuçları Şekil 5.21 ve Tablo 5.5'te gösterilmiştir. İşletmenin ilk 32 günü reaktörler kesikli olarak havalandırıldığı için işletmenin ilk günlerinde NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Aerobik sistemlerde NH<sub>4</sub>-N ve TKN konsantrasyonları anaerobik sisteme göre daha düşüktür. Bunun sebebi anaerobik sistemlerde denitrifikasyon-nitrifikasyon gerçekleşmezken aerobik sistemlerde NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N ve NO<sub>3</sub>-N dönüşmektedir. Kesikli havalandırmanın ardından sistem anaerobik olarak işletildiğinde NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. 50. günden itibaren NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonları ortamda oksijen olmadığı için NO<sub>2</sub>-N ve NO<sub>3</sub>-N dönüşmediği için Reaktör C ve Reaktör D'de işletme süresi boyunca artış göstermiştir.

TKN konsantrasyonları işletmenin 36. ve 65. Gününde ölçülmüştür. Tablo 5.5 incelendiğinde ölçümlerin yapılmaya başlandığı günler sistem anaerobik olarak işletildiği için TKN konsantrasyonlarında az miktarda azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.21: Biyoreaktör sızıntı suyu NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonu değişimi

**Tablo 5.5:** Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonları değişimi

İşletme Günü	Reaktör C (mg/l)	Reaktör D (mg/l)
36	70	112
65	60	92

### 5.3.6 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ<sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerdeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonlarındaki değişimi Tablo 5.6'da gösterilmiştir. Biyoreaktörlerin işletim süresince 4 ayrı günde BOİ<sub>5</sub> ölçümleri yapılmıştır. 19. gündeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör C'de 2543 mg/l ve Reaktör D'de 2243 mg/l ve BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları ise Reaktör C'de 0,27 Reaktör D'de 0,24'tür. Verilen kesikli hava sayesinde organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçmesiyle birlikte işletmenin 37. ve 54. günlerinde BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranlarında artış gözlemlenmiştir. Fakat bu artış kekik atığının daha yüksek lignin ve selüloz içeriğinden dolayı ayçiçeği sapına göre daha azdır. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranının düşük olması o atığın biyolojik parçalanabilirliğinin zor olduğunu göstermektedir. Bu değer bize kekik atığının parçalanması için gereken oksijenin daha fazla olması gerektiğini göstermektedir. Ölçülen BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları KOİ konsantrasyonlarına paralel olarak işletme süresi boyunca azalarak devam etmiştir. 68. gündeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla 352 mg/l ve 684 mg/l'dir. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları ise Reaktör C'de 0,23 Reaktör D'de 0,24'tür. BOİ<sub>5</sub> giderim verimleri hesaplandığında Reaktör C'de %86 Reaktör D'de %69'dur.

Lignin içeriği yüksek kekik atığının reaktörlere yüklenmesi sonucunda yapılan kesikli havalandırmanın %26'luk lignin ve selüloz içeriğine sahip kekik atığının parçalanması için daha fazla oksijene ihtiyacı olduğu sonucuna varılmıştır.

**Tablo 5.6:** Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi

	Reaktör C				Reaktör D			
	19.gün	37.gün	54.gün	68.gün	19.gün	37.gün	54.gün	68.gün
BOİ <sub>5</sub> (mg/l)	2543	965	517	352	2243	1287	852	684
KOİ (mg/l)	9427	3324	1914	1524	9343	4596	3276	2850
BOİ <sub>5</sub> /KOİ	0,27	0,29	0,27	0,23	0,24	0,28	0,26	0,24

### 5.3.7 Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi

Tablo 5.7’de biyoreaktörler için kullanılan atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce ve işletme tamamlandıktan sonra su içeriği ve organik madde yüzdeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerde sırasıyla Reaktör C’de %14 Reaktör D’de ise %12 organik madde giderimi sağlanmıştır.

Reaktör C’de organik madde giderim verimi Reaktör D’ye göre her ne kadar fazla olsa da her iki reaktörde de kekik atığının lignin ve selüloz içeriğinin çok yüksek olması nedeniyle organik madde giderimi az miktarlarda gerçekleşmiştir. Zaten elde edilen gaz miktarlarından da bu durum gözlemlenmektedir. Ayçiçeği sapına kıyasla kekik atığının semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanmasının daha zor olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 5.7:** Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi

	Reaktör C		Reaktör D	
	İşletme öncesi	İşletme sonrası	İşletme öncesi	İşletme sonrası
<b>Su Muhtevası (%)</b>	23	77	4	77
<b>Organik Madde (%)</b>	95	82	93	82

## **5.4 Park-Bahçe Atıklarının Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması**

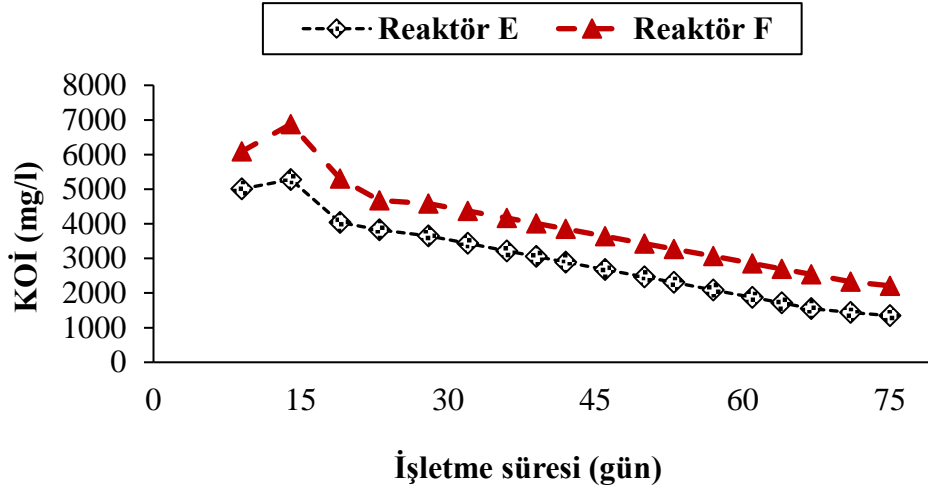
Park-bahçe atıkları, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör E'de %20 evsel + %80 park-bahçe atığı oranında, Reaktör F'de ise %100 park-bahçe atığı olacak şekilde karıştırılarak laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanmaya bırakılmıştır. Katı atıkta çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca park-bahçe atıklarında lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyunda ise KOİ, pH, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları ile reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı miktarları da çalışma periyodu boyunca analiz edilmiştir.

### **5.4.1 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi**

Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 75 günlük işletme periyodu boyunca oluşan sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları Şekil 5.22'de gösterilmektedir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere ait sızıntı suyu örneklerinde başlangıç KOİ konsantrasyonları Reaktör E ve Reaktör F'de sırasıyla; 5006 mg/l ve 6093 mg/l'dir. Biyoreaktörlerdeki sızıntı suyunda KOİ konsantrasyonları 14. günden itibaren artış göstermiş ve devam eden işletme süresi boyunca konsantrasyonlar düşmüştür. 14. gündeki konsantrasyonlar Reaktör E ve Reaktör F'de sırasıyla 5277 mg/l ve 6878 mg/l'dir. Havalandırma işlemi işletme periyodunun ilk 32 günü gerçekleştirilmiştir. 32. gündeki bu konsantrasyonlar Reaktör E ve Reaktör F'de sırasıyla 3432 mg/l ve 4373 mg/l'dir.

75 günlük işletme periyodu sonucunda Reaktör E'deki KOİ konsantrasyonu 1346 mg/l, Reaktör F'deki KOİ konsantrasyonu ise 2210 mg/l olarak ölçülmüştür. KOİ giderim verimleri hesaplandığında Reaktör E'de KOİ giderim verimi %74 Reaktör F'de ise bu değer %68 olarak saptanmıştır. Ayçiçeği sapı ve kekik atığına göre park-bahçe atıklarının selüloz içeri düşüktür. Ancak ayçiçeği sapına ve kekik atığına göre lignin içeriğinin daha yüksek olmasından dolayı atıkların bünyesinde

bulunan organik maddelerin parçalanarak sızıntı suyuna geçmesi zor olduğu için KOİ giderim verimleri bu iki atığa göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

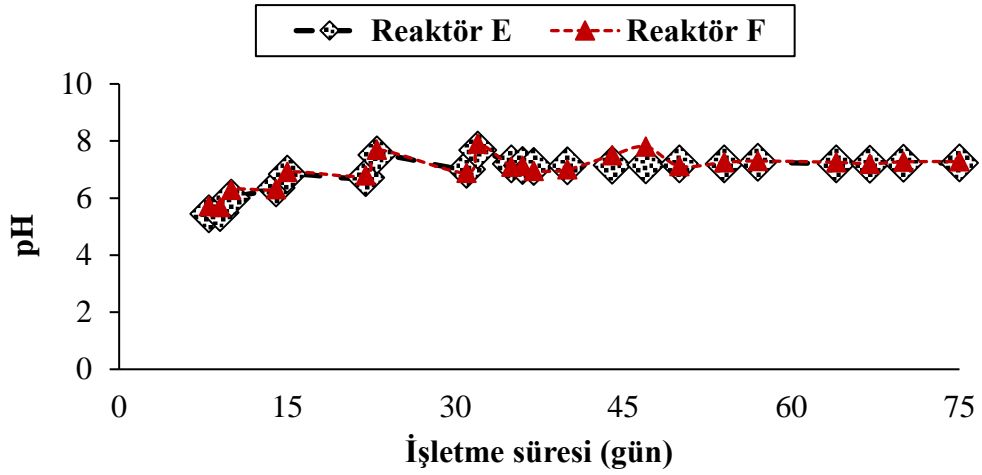


Şekil 5.22: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi

#### 5.4.2 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki pH değişimleri Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Şekil 5.23 incelendiğinde pH değerlerinde işletmenin 9. gününden itibaren reaktörlere verilen kesikli hava sayesinde artış göstermiştir. En yüksek pH değerlerine işletmenin 32. Gününde Reaktör E'de 7,68 ve Reaktör F'de 7,9 değerlerine ulaşılmıştır. Cossu ve diğ. (2003), havalandırma ve sızıntı suyu geri devrinin pH değerlerini arttırdığını ve UYA'yı azalttığını bulmuştur.

75 günlük işletme periyodu boyunca reaktörlerde pH değerleri sırasıyla Reaktör E'de 5,44-7,68 Reaktör F'de ise 5,72-7,9 arasında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimleri

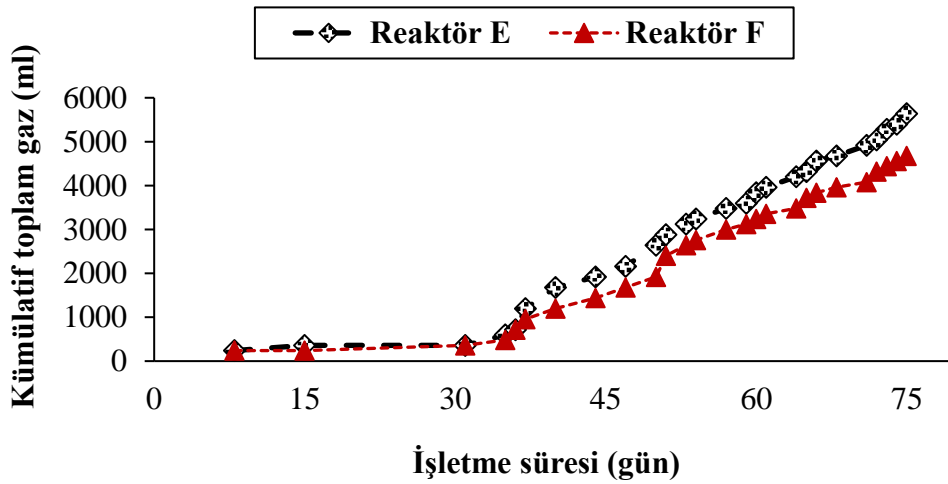
#### 5.4.3 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı

Biyogaz, hacimce yaklaşık %50-80 metan ( $\text{CH}_4$ ), %30–%40 karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), hidrojen sülfür izleri ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrojen ( $\text{H}_2$ ) içerir. Bu bileşiklerin yüzdeleri parçalanmış substrata ve uygulanan teknolojiye göre değişir (Fang ve diğ. 2018). Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif toplam gaz miktarı Şekil 5.24’te gösterilmiştir.

Chen ve diğ. (2014), gıda atıklarının ve yeşil atıkların farklı karışım oranlarında anaerobik birlikte çürütülmesi sırasındaki biyogaz üretimdeki etkisini incelemişlerdir. Biyogaz üretim süreçleri, biyogaz üretimi gözlemlenmeye kadar yaklaşık 50 gün sürmüştür. Tüm çürütme sistemlerinde biyogaz üretimi ilk günden başlamıştır. En yüksek günlük biyogaz üretim oranları, 1,5 günlük çürümeden sonra gözlemlenmiştir. %100 yeşil atıkların (GW) olduğu çürütme sistemi %100 gıda atıklarının (FW) olduğu çürütme sisteminden 1,5 kat daha yüksek biyogaz üretim oranı ve 80,6 ml/g’lık en yüksek günlük biyogaz üretimi ile sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, %100 yeşil atıkların olduğu çürütme sistemi için en yüksek biyogaz üretim hızından hemen sonra biyogaz üretim hızı düşmüştür ve 6,5 ila 12,5 gün arasında hiçbir biyogaz üretilmemiştir, bu da belirgin bir şiddetli inhibisyonun meydana geldiğini göstermektedir. Yaklaşık 10 günlük kendi kendine iyileşmeden sonra,

sistem yeniden biyogaz üretmeye başlamış ve 30. günden 45. güne kadar daha yüksek bir günlük biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. 80:20 ve 60:40 FW/GW karışım oranlarına sahip çürütme sistemleri de benzer biyogaz üretim süreçleri gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmaya benzer şekilde Rektör E’de ve Rektör F’de 16. günden 32. güne kadar biyogaz üretimi gerçekleşmemiştir. İşletmenin devam eden günlerinde ise organik fraksiyonlu evsel atıklarla park-bahçe atık karışımı bulunan Reaktör E’de sadece park- bahçe atığı bulunan Reaktör F’ye göre daha fazla toplam gaz oluşmuştur.

75 günlük işletme periyodu boyunca oluşan kümülatif toplam gaz miktarları Reaktör E’de 5,64 L, Reaktör F’de 4,68 L gaz ölçülmüştür. Reaktör E’deki organik fraksiyonlu evsel atıkların lignin içeriği yüksek park-bahçe atıklarının parçalanmasına katkı sağladığı ve Reaktör F’ye göre daha az park-bahçe atığı olduğu için oluşan toplam gaz miktarı da buna paralel olarak daha fazladır.



Şekil 5.24: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı

#### 5.4.4 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif metan gazı miktarı ve yüzdesi Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da gösterilmiştir. Reaktörlerde metan gazı ölçümleri işletilmeye başladıktan 8 gün sonra ölçülmüştür. 8.günden sonra reaktörlerde 7 gün boyunca metan gazı çıkışı olmamıştır. 15. günde

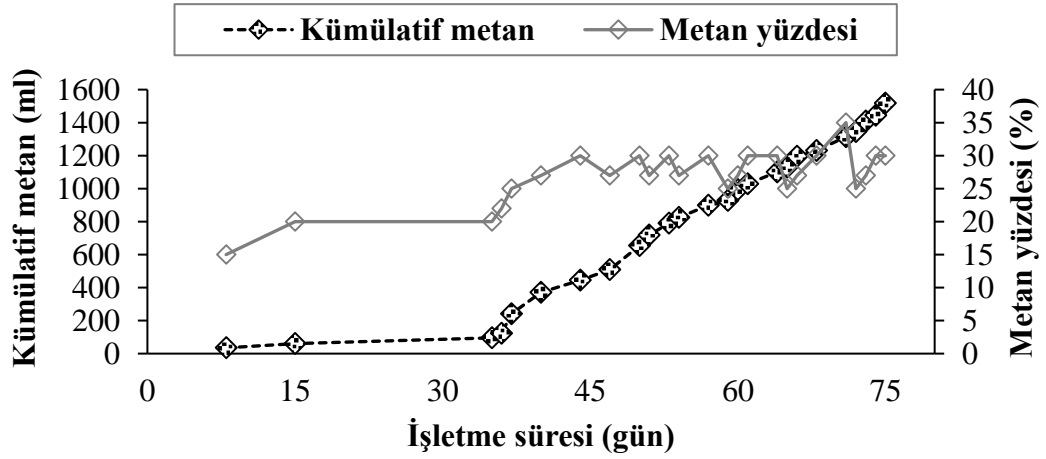
Reaktör E’de 25 ml ve Reaktör F’de 20 ml metan gazı çıkışı olmuştur. 15. günden 35. güne kadar reaktörlerde metan üretimi gerçekleşmemiştir. 75 günlük işletme periyodu sonucunda semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerdeki kümülatif olarak hesaplanan metan miktarları sırasıyla Reaktör E’de 1,517 L ve Reaktör F’de 1,126 L metan gazı elde edilmiştir. Reaktörlerdeki metan yüzdesi çalışma periyodu boyunca toplam gazın sırasıyla Reaktör E’de %27’si Reaktör F’de %24’ü metan gazıdır. Yeşil atıkların bileşim oranı ne kadar yüksekse, metan içeriği o kadar düşüktür. Organik fraksiyonlu evsel atık ve park-bahçe atıklarının olduğu Reaktör E %100 park-bahçe atığı olan Reaktör F’ye göre daha yüksek metan içeriğine sahip olması, gıda atıklarında bulunan yüksek protein içeriğinden kaynaklanmaktadır (Chen ve diğ. 2014).

Mu ve diğ. (2020), budama atıkları + kanalizasyon çamuru + organik atık karışımı olan reaktörler budama atıklarının kanalizasyon çamuru ile karıştırılan reaktörlere daha yüksek metan verimleri olduğunu gözlemlemiştir.

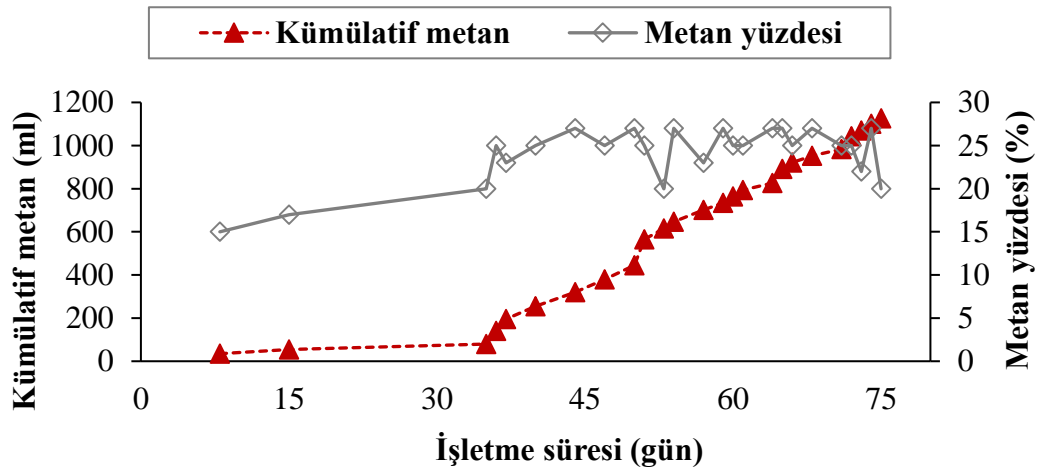
Lin ve diğ. (2014), işlenmemiş bahçe budamalarından metan verimleri, inatçı odunsu yapı nedeniyle nispeten düşüktür (30 günlük katı hal anaerobik çürüme sırasında sırasında 20-74 L/kg VS). Katı hal anaerobik çürüme süresinin 60 güne çıkarılmasıyla daha yüksek bir metan verimi (97 L/kg VS) elde edilmiştir.

Park-bahçe atıkları %28,82 gibi yüksek bir liginin içeriğine sahiptir. Ligninin varlığı, selülozun kristalliği ve sınırlı yüzey mevcudiyeti, lignoselülozik biyokütlenin biyolojik olarak parçalanabilirliğini azaltarak hidroliz basamağını metan üretimini sınırlayan engellerden biri haline getirir (Frigon ve Guiot).

Ayçiçeği sapı ve kekik atığına göre park-bahçe atıklarında metan veriminin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca park-bahçe atıkların lignin içeriğinin kekik atığına ve ayçiçeği sapına göre fazla olması metan oluşumu üzerinde olumsuz etkiye neden olmuştur.



Şekil 5.25: Reaktör E'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi



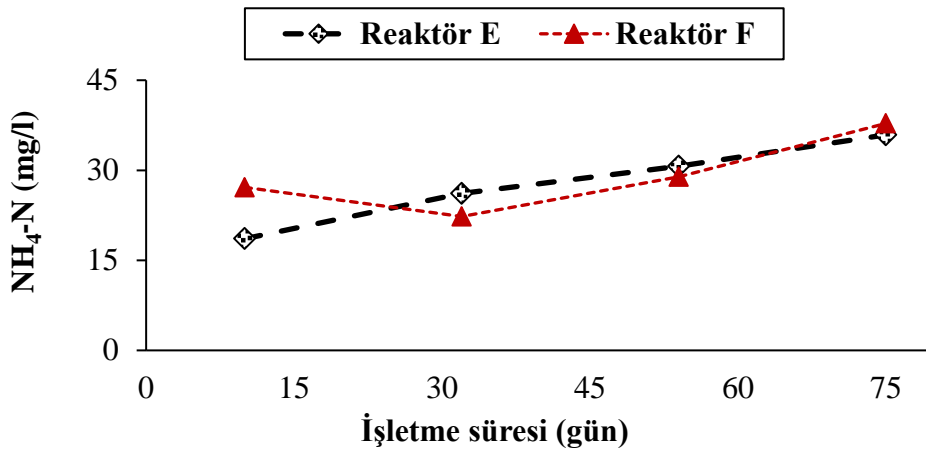
Şekil 5.26: Reaktör F'de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

#### 5.4.5 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında $\text{NH}_4\text{-N}$ ve TKN Konsantrasyonu Değişimi

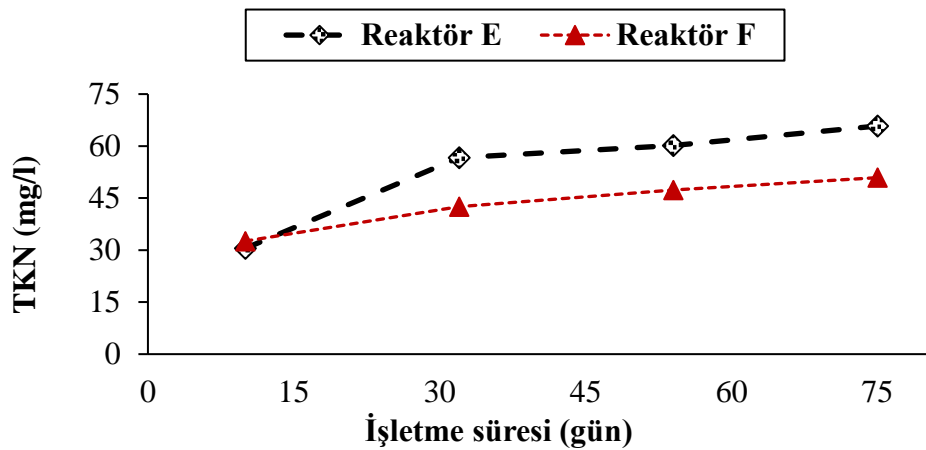
Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN sonuçları Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de gösterilmiştir. İşletme süresi boyunca 4 ayrı günde TKN ve  $\text{NH}_4\text{-N}$  ölçümleri yapılmıştır. İşletmenin ilk 32 günü reaktörler kesikli olarak havalandırıldığı için  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN konsantrasyonlarının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Panigrahi ve diğ. (2020), park-bahçe atıklarının yüksek C/N oranı, düşük protein çözünürlük oranını etkiler ve bir sistem içinde düşük toplam amonyum azotu ve yağ asidi konsantrasyonlarına yol açtığını bildirmiştir.

Kesikli havalandırmanın ardından sistem anaerobik olarak işletildiğinde  $\text{NH}_4\text{-N}$  ve TKN konsantrasyonlarında 54. ve 75. günlerde artış gözlemlenmiştir. 75. günde  $\text{NH}_4\text{-N}$  konsantrasyonları Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla 35,9 mg/l ve 37,8 mg/l, TKN konsantrasyonları ise 65,08 mg/l ve 50,9 mg/l’dir.



Şekil 5.27: Biyoreaktör sızıntı suyu  $\text{NH}_4\text{-N}$  konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.28: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonu değişimi

#### 5.4.6 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BOİ<sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerdeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Tablo 5.8’de gösterilmiştir. Biyoreaktörlerin işletim süresince 4 ayrı günde BOİ<sub>5</sub> ölçümleri yapılmıştır. 14. günde BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla; 1109 mg/l ve 1307 mg/l ve BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları sırasıyla 0,21 ve 0,19’dur. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranının düşük olması o atığın biyolojik olarak parçalanabilirliğinin zor olduğunu göstermektedir. Buna göre her iki reaktörde de başlangıç BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranı düşüktür. İşletmenin 36. gününde reaktörlerdeki atıkların bünyesinde bulunan organik maddeler verilen kesikli hava sayesinde sızıntı suyuna geçmiş ve bu oranlarda bir miktar artış gözlemlenmiştir. İşletmenin devam eden günlerinde sistem anaerobik olarak işletilmiş ve bu oranlar giderek azalmıştır. 71. gündeki BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla 230 mg/l ve 400 mg/l’dir. BOİ<sub>5</sub> / KOİ oranları ise 0,16 ve 0,17’dir. BOİ<sub>5</sub> giderim verimleri hesaplandığında Reaktör E’de %79 Reaktör F’de %69’dur.

Lignin içeriği %29 olan park-bahçe atıklarının reaktörlere yüklenmesi sonucunda yapılan kesikli havalandırma sayesinde semi-aerobik koşullar altında atıkların bünyesinde buluna organik maddelerin bir kısmı parçalanarak sızıntı suyuna geçmiştir, fakat sistem anaerobik olarak işletildiğinde organik atıkların parçalanması için gereken oksijen miktarı reaktörlerde bulunmadığı için sızıntı suyundaki mevcut organik maddeler metan bakterileri tarafından tüketilmiş ve atıkların bünyesinde bulunan organik maddelerin parçalanmasında artış gözlemlenmemiştir.

**Tablo 5.8:** Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi

	Reaktör E				Reaktör F			
	14.gün	36.gün	53.gün	71.gün	14.gün	36.gün	53.gün	71.gün
BOİ <sub>5</sub> (mg/l)	1109	773	530	230	1307	916	655	400
KOİ (mg/l)	5277	3217	2304	1437	6878	4163	3272	2328
BOİ <sub>5</sub> /KOİ	0,21	0,24	0,23	0,16	0,19	0,22	0,2	0,17

#### 5.4.7 Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi

Tablo 5.9’da biyoreaktörler için kullanılan atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce ve işletme tamamlandıktan sonra su içeriği ve organik madde yüzdeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerde sırasıyla Reaktör E’de %17, Reaktör F’de ise %12 organik madde giderimi sağlanmıştır.

Lignoselülozik biyokütle, ligninin ve lignoselülozik atıkların biyolojik olarak parçalanmasını zorlaştıran diğer hücre duvarı polisakaritlerinin karmaşık yapıları nedeniyle genellikle düşük biyogaz üretimi ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gösterir (Li ve diğ. 2013). Reaktör E’de organik fraksiyonlu evsel atıkların olması lignin içeriği yüksek park-bahçe atıklarının parçalanması üzerinde olumlu etki sağlamasına rağmen iki reaktörde organik madde gideriminin düşük olduğu gözlemlenmiştir.

**Tablo 5.9:** Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi

	Reaktör E		Reaktör F	
	İşletme öncesi	İşletme sonrası	İşletme öncesi	İşletme sonrası
<b>Su Muhtevası (%)</b>	60	85	53	91
<b>Organik Madde (%)</b>	96	80	94	83

#### 5.5 Fındık Zürufunun Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Parçalanması

Fındık zürufu, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör G’de %20 evsel + %80 fındık zürufu oranında ve Reaktör H’de ise %100 fındık zürufu olacak şekilde karıştırılarak laboratuvar ölçekli biyoreaktörlerde semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanmaya bırakılmıştır. Katı atıkta çalışma periyodunun öncesi ve sonrasında su muhtevası ve organik madde deneyleri yapılmıştır. Ayrıca fındık zürufunda lignin, selüloz, hemiselüloz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sızıntı suyunda ise KOİ, pH, NH<sub>4</sub>-N, TKN, BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları çalışma periyodu boyunca

ölçülmüştür. Bunların yanı sıra reaktörlerde oluşan toplam gaz ve metan gazı analiz edilmiştir.

### **5.5.1 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında KOİ Konsantrasyonları Değişimi**

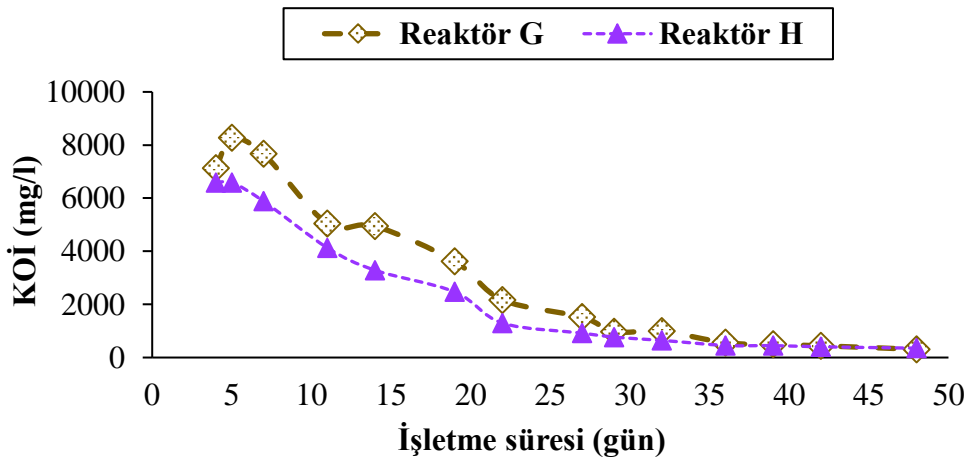
Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 50 günlük işletme periyodu boyunca oluşan sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları Şekil 5.29'da gösterilmektedir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlere ait sızıntı suyu örneklerinde başlangıç KOİ konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de sırasıyla; 7123 mg/l ve 6579 mg/l'dir. 5. günde KOİ konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. 5. gündeki KOİ konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de sırasıyla 8267 mg/l ve 6590 mg/l'dir. Reaktörlerde 7. günden itibaren KOİ konsantrasyonları azalmış ve bu azalma işletme periyodu boyunca devam etmiştir. Havalandırma işlemi işletme periyodunun ilk 22 günü gerçekleştirilmiştir. 22. gündeki KOİ konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de sırasıyla 2167 mg/l ve 1295 mg/l'dir. Semi-aerobik koşullarda Reaktör G'de %73 Reaktör H'de %80'lik yüksek bir KOİ giderim verim sağlanmıştır. Bunun nedeni aerobik prosesin avantajlarından biri olan hidroliz ve asitleşme safhasının anaerobik prosese göre daha hızlı olmasıdır. Bu süreç ayçiçeği sapı, kekik atığı ve park-bahçe atıklarına göre daha hızlı gerçekleştiğinden reaktöre yüklenen organik atıklar parçalanıp daha hızlı bir şekilde sızıntı suyuna geçmiş, daha kısa sürelerde stabilizasyon sağlanmış ve sistemin anaerobik işletme sürecine 28 gün devam edilmiştir. Anaerobik işletme koşullarında KOİ konsantrasyonları semi-aerobik koşullara göre daha yavaş düştüğü gözlemlenmiştir. 50 günlük işletme süresi sonunda reaktörlerdeki nihai KOİ konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de sırasıyla 308 mg/l ve 352 mg/l'dir. KOİ giderim verimleri Reaktör G'de %96, Reaktör H'de ise %94 olarak hesaplanmıştır.

Ko ve diğ. (2016), bir anaerobik biyoreaktör ve farklı havalandırma frekanslarına sahip üç hibrit biyoreaktör (günde bir, iki ve dört kez) dahil olmak üzere farklı biyoreaktör işlemlerini simüle etmek için dört laboratuvar ölçekli reaktör inşa edilmiş ve yaklaşık 10 ay boyunca çalıştırılmıştır. Reaktörlerde kullanılan atıklar

Çin'deki tipik bir kentsel atık bileşimini temsil edecek şekilde hazırlanmıştır. Bu bileşenler arasında gıda atıkları, kâğıt, plastik, cam, metal ve inert malzeme bulunmaktadır. Reaktörlerdeki başlangıç KOİ konsantrasyonu 60000 mg/l'nin üzerindedir. Sızıntı suyundaki KOİ konsantrasyonları 100 gün içinde hızla düşmüştür. KOİ ve BOİ konsantrasyonları tüm havalandırılmış biyoreaktörlerde başlangıç konsantrasyonlarının %96'sından fazlası giderilmiştir.

Ge ve diğ. (2016), ekzojen aerobik bakteri karışımının biyoreaktörlerde kentsel katı atıktan metan üretimi ve biyodegradasyonu üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Lignin ayrışması üzerine yapılan bu çalışmada bir reaktöre beyaz çürükçül mantar ilave edilmiştir. Lignin ayrışmasını kolaylaştırmak için mantar ilave edilen bu reaktörde KOİ azalması hızlı bir şekilde başlamıştır. Mantar ilavesi yapılan reaktörde yaklaşık olarak %91 oranında KOİ giderim verimi sağlanmıştır. Bizim çalışmamızın başında da yapılan kesikli havalandırma ile yüksek KOİ giderme verimi sağlanmıştır.

Fındık zürufu çalışma kapsamında kullanılan atıklardan en yüksek lignin oranına sahip olan atıktır. Ancak diğer atıklara göre daha düşük selüloz içeriğine sahip olması nedeniyle KOİ konsantrasyonlarının giderim verimleri aynı koşullarda işletilen lignin içeriği daha düşük ayçiçeği sapı ile benzer KOİ giderim verimleri sağlanmıştır.



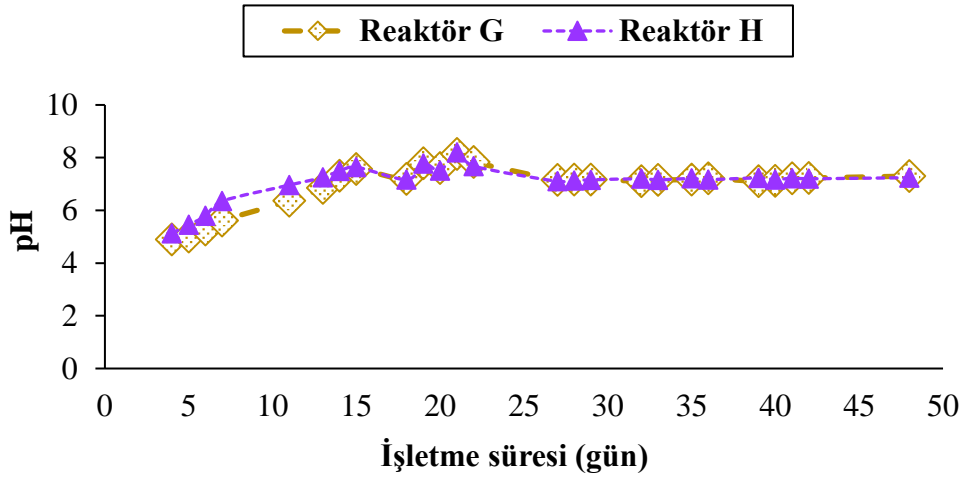
Şekil 5.29: Biyoreaktör sızıntı suyu KOİ konsantrasyonları değişimi

### 5.5.2 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında pH Değişimleri

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki pH değişimleri Şekil 5.30'da gösterilmiştir. 5. günden itibaren pH değerlerinde artış gözlemlenmiştir. pH değerlerindeki bu artış reaktörlerde yapılan havalandırma etkisiyle hidroliz ve asitleşme safhasının daha hızlı gerçekleştiği ve reaktörlerin metanlaşma safhasına geçtiğini göstermektedir.

Sang ve diğ. (2009), hava enjeksiyonlu aerobik biyoreaktörün asit ürünlerini hızlı bir şekilde parçalayarak sızıntı suyunun pH'ını artırabileceğini bildirmiştir.

En yüksek pH değerleri 21. günde ölçülmüştür ve bu değerler Reaktör G'de 8,14 Reaktör H'de 8,2'dir. 50 günlük işletme periyodu boyunca reaktörlerde pH değerleri sırasıyla Reaktör G'de 4,89-8,14 Reaktör H'de ise 5,13-8,2 arasında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.30: Biyoreaktör sızıntı suyu pH değişimi

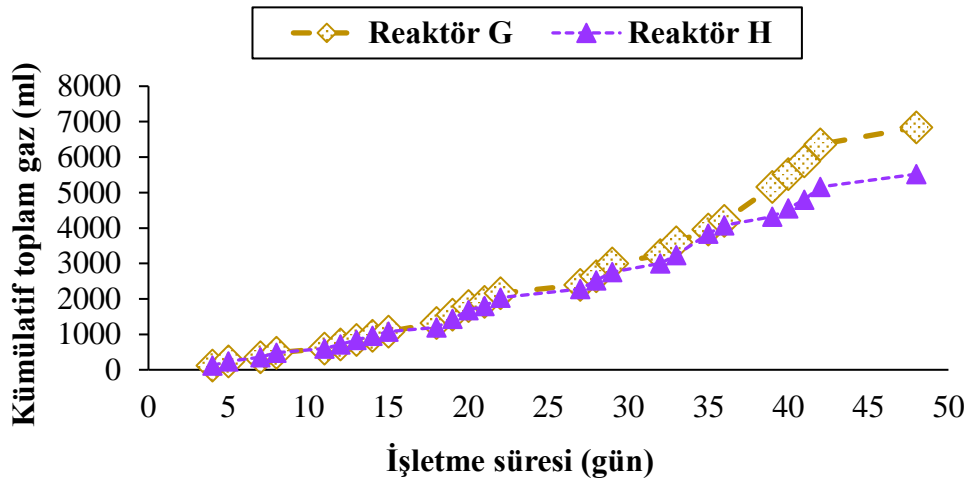
### 5.5.3 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Toplam Gaz Miktarı

Biyogaz üretimi atık bileşimi, nem içeriği, yoğunluk, atık derinliği, pH ve diğer çevresel koşullardan etkilenebilir (Sutthasil ve diğ. 2019). Asitojenez aşaması

ve metanojenez aşaması, biyoreaktör depolama alanlarında biyogaz üretimini oldukça etkileyen iki önemli aşamadır (Chakraborty ve Venkata Mohan 2018).

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif toplam gaz miktarı Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Reaktörlerde oluşan gaz miktarları karşılaştırıldığında Reaktör G’de toplam gaz miktarı Reaktör H’den daha fazladır. 50 günlük işletme periyodunda oluşan kümülatif toplam gaz miktarları Reaktör G’de 6,84 L, Reaktör H’de 5,52 L gaz ölçülmüştür.

Fındık zürufu park-bahçe atığına göre daha yüksek lignin içeriğine sahip olmasına rağmen oluşan toplam gaz miktarı daha fazladır. Bunun yanı sıra fındık zürufu kullanılan tarımsal katı atıklar içinde en düşük selüloza sahip olması toplam gaz oluşmasında etkili olmuş olabilir.

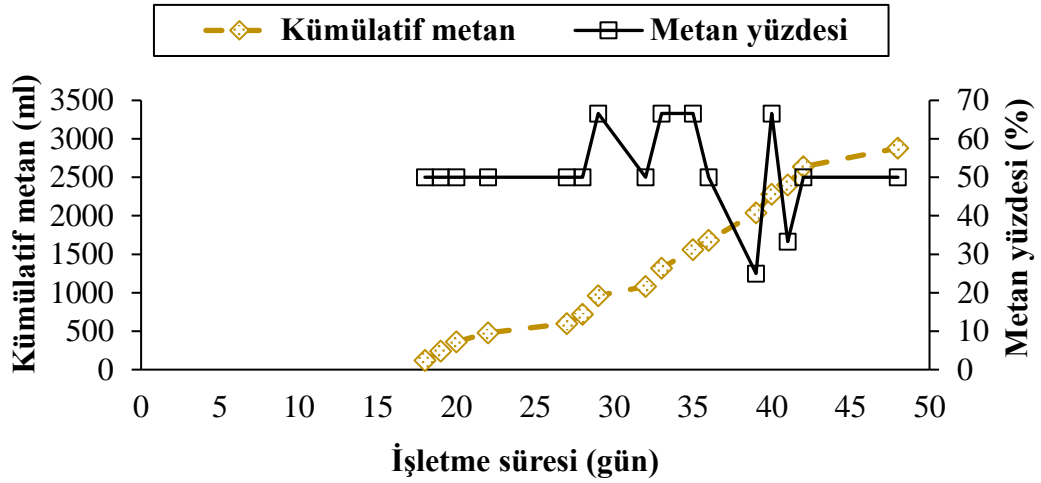


Şekil 5.31: Biyoreaktörlerde oluşan kümülatif toplam gaz miktarı

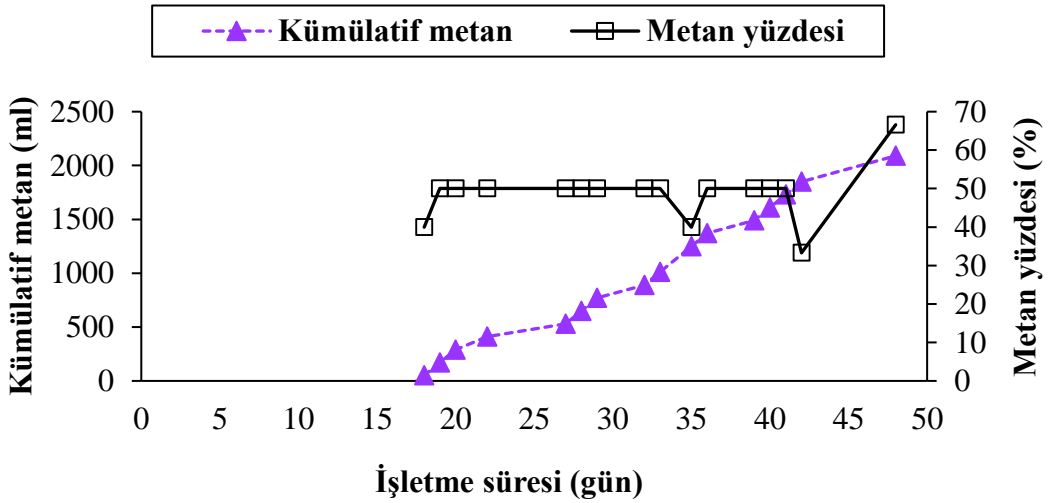
#### 5.5.4 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktörlerde Oluşan Kümülatif Metan Gazı Miktarı ve Yüzdesi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında işletilen biyoreaktörlerdeki kümülatif metan gazı miktarı ve yüzdesi Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’de gösterilmiştir. İşletmenin kesikli havalandırma bölümünde reaktörlerde az miktarda metan gazı olduğu gözlemlenmiştir. Charles ve diğ. (2009), artan havalandırma süresinin metan üretiminde bir azalmaya yol açtığını bildirmiştir.

Reaktörlerin kesikli havalandırmalı kısmı tamamlanıp anaerobik işletme aşamasına geçildiğinde metan gazı miktarlarında artış gözlemlenmiştir. Semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerdeki kümülatif olarak hesaplanan metan gazı Reaktör G’de 2,88 L ve Reaktör H’de 2,09 L gaz ölçülmüştür. Reaktörlerde oluşan toplam gazın Reaktör G’de %52’si Reaktör H’de %49’u metan gazıdır.



Şekil 5.32: Reaktör G’de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

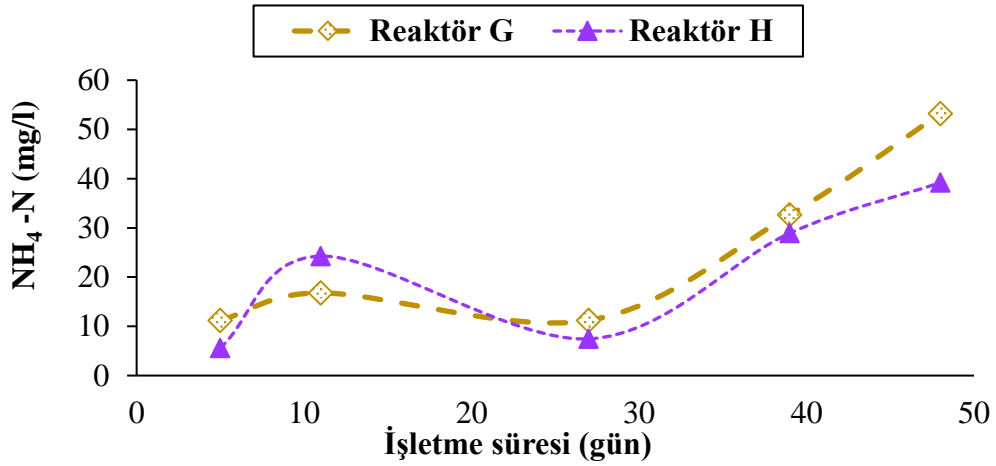


Şekil 5.33: Reaktör H’de oluşan kümülatif metan gazı miktarı ve metan yüzdesi

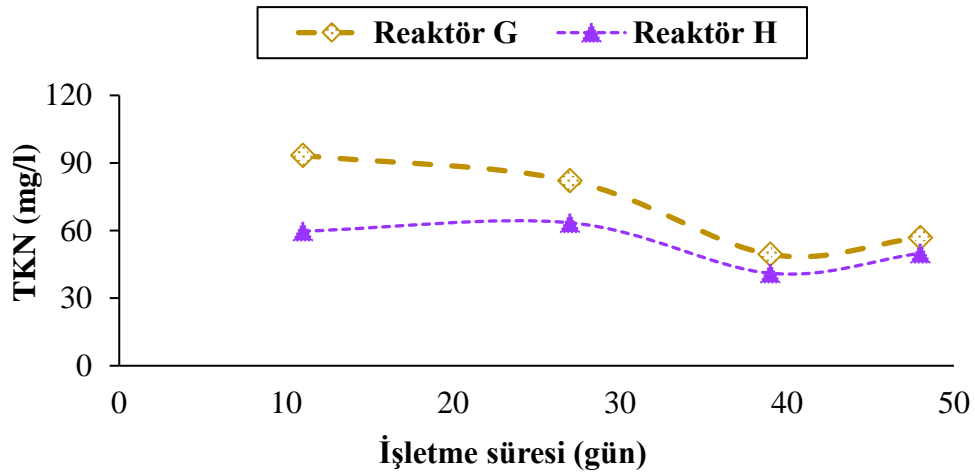
### 5.5.5 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında NH<sub>4</sub>-N ve TKN Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarındaki biyoreaktörlerden alınan sızıntı suyundaki NH<sub>4</sub>-N ve TKN sonuçları Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'te gösterilmiştir. İşletmenin kesikli olarak havalandırıldığı bölümünde reaktörlerde düşük konsantrasyonlarda NH<sub>4</sub>-N ölçülmüştür. Kesikli havalandırmanın ardından sistem anaerobik olarak işletildiğinde ortamda oksijen bulunmadığı için NO<sub>2</sub>-N ve NO<sub>3</sub>-N'e dönüşüm olmadığı için NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonlarında artış gözlemlenmiştir. 48. günde NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonları Reaktör G'de 53,2 mg/l ve Reaktör F'de 39,2 mg/l, TKN konsantrasyonları ise Reaktör G'de 56,93 mg/l ve Reaktör F'de 49,93 mg/l'dir.

Aerobik biyoreaktörlerde nitrifikasyon süreçleri meydana gelebilir ve amonyumun nitrit ve nitratlara dönüştürülmesi gerçekleşebilir (Cossu ve diğ. 2016). Yazarlar tarafından yapılan çalışmada testin ilk yarı aerobik aşaması sırasında sızıntı suyu numunelerinde nitrat bulunmamıştır ve enjekte edilen hava miktarının düşük olması nedeniyle amonyum azalması tespit edilmemiştir.



Şekil 5.34: Biyoreaktör sızıntı suyu NH<sub>4</sub>-N konsantrasyonu değişimi



Şekil 5.35: Biyoreaktör sızıntı suyu TKN konsantrasyonu değişimi

### 5.5.6 Semi-aerobik / anaerobik Biyoreaktör Sızıntı Sularında BO<sub>5</sub> Konsantrasyonu Değişimi

Semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerdeki BO<sub>5</sub> konsantrasyonlarındaki değişimi Tablo 5.10'da gösterilmiştir. Biyoreaktörlerin işletim süresince 4 ayrı günde BO<sub>5</sub> ölçümleri yapılmıştır. 5. gündeki BO<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de ve 2000 mg/l olarak ölçülmüştür. BO<sub>5</sub> / KOİ oranları ise Reaktör G'de 0,24 ve Reaktör H'de 0,3'tür. Ayçiçeği sapı, kekik atığı ve park-bahçe atıklarına göre başlangıç BO<sub>5</sub> / KOİ oranları yüksektir. Bunun sebebi fındık zürufunun kullanılan diğer tarımsal atıklara göre düşük selüloz içeriğine sahip olmasının neden olduğu düşünülmektedir. İşletmenin devam eden günlerinde de organik maddelerin parçalanıp sızıntı suyuna geçmesiyle birlikte BO<sub>5</sub> / KOİ oranında artış gözlemlenmiştir ve 27. gündeki BO<sub>5</sub> / KOİ oranı Reaktör G'de 0,51 ve Reaktör F'de 0,54'tür. Kjeldsen ve diğ. göre (2002), 0,4 ile 0,8 arasındaki bir oran, yüksek biyolojik parçalanabilirlik anlamına gelir. İşletmenin 42. günde yapılan analizler sonucunda BO<sub>5</sub> konsantrasyonları Reaktör G ve Reaktör H'de 150 mg/l ve BO<sub>5</sub> / KOİ oranları ise 0,33 ve 0,37'dir.

Lignin içeriği yüksek fındık zürufunun reaktörlere yüklenmesi neticesinde yapılan kesikli havalandırma sayesinde organik maddelerin parçalanmasını

kolaylaştırılmıştır. BOİ<sub>5</sub> giderim verimleri hesaplandığında Reaktör G ve Reaktör H'de %92'dir.

**Tablo 5.10:** Biyoreaktör sızıntı suyu BOİ<sub>5</sub> konsantrasyonları değişimi

	Reaktör G				Reaktör H			
	5.gün	14.gün	27.gün	42.gün	5.gün	14.gün	27.gün	42.gün
BOİ <sub>5</sub> (mg/l)	2000	1500	500	150	2000	1500	500	150
KOİ (mg/l)	8267	4945	1523	442	6590	3284	919	404
BOİ <sub>5</sub> /KOİ	0,24	0,3	0,51	0,33	0,3	0,45	0,54	0,37

### 5.5.7 Biyoreaktörlerde Kullanılan Katı Atıklarda Su Muhtevası ve Organik Madde Değişimi

Tablo 5.11'de biyoreaktörler için kullanılan atıklarda reaktörlere yüklenmeden önce ve işletme tamamlandıktan sonra su içeriği ve organik madde yüzdeleri verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre semi-aerobik / anaerobik olarak işletilen reaktörlerde sırasıyla Reaktör G'de %24, Reaktör H'de ise %16 organik madde giderimi sağlanmıştır.

Reaktör G'de organik madde giderim verimi Reaktör F'ye göre her ne kadar fazla olsa da her iki reaktörde de fındık zürufunun %33,95 lignin içeriğine sahip olması nedeniyle organik madde giderimi az miktarlarda gerçekleşmiştir.

**Tablo 5.11:** Biyoreaktör içeriği su muhtevası ve organik madde değişimi

	Reaktör G		Reaktör H	
	İşletme öncesi	İşletme sonrası	İşletme öncesi	İşletme sonrası
<b>Su Muhtevası (%)</b>	77	90	64	89
<b>Organik Madde (%)</b>	95	72	93	78

Yapılan çalışmalar sonucunda nihai hedefimiz olan reaktör içeriklerinin organik madde miktarının biyoreaktörlerde ayrışmasını sağlayıp organik madde giderimini sağlamaktır. Kullanılan atıklardaki lignin ve selüloz içeriğinin yüksek olması nedeni ile organik maddelerin parçalanabilmesi için reaktörlerde kısmi

havalandırma uygulanmıştır. Tablo 5.12’de reaktörlerde kullanılan atıkların selüloz, hemiselüloz, lignin ve reaktörlere yüklenmeden önceki organik madde miktarı ve ve çalışma süresi sonundaki organik madde giderimleri toplu bir şekilde gösterilmektedir.

**Tablo 5.12:** Biyoreaktör içeriklerinde yapılan analiz sonuçları

<b>Atık Türü</b>	<b>Selüloz (%)</b>	<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>	<b>Organik Madde Miktarı (%)</b>	<b>Organik Madde Giderimi (%)</b>
Ayçiçeği Sapı (anaerobik)	24,463	43,667	17,233	Reaktör <sub>1</sub> , %82	Reaktör <sub>1</sub> , %43
				Reaktör <sub>2</sub> , %89	Reaktör <sub>2</sub> , %52
Ayçiçeği sapı (semi-aerobik/anaerobik)	24,463	43,667	17,233	Reaktör A <sub>1</sub> , %88	Reaktör A <sub>1</sub> , %60
				Reaktör B <sub>1</sub> , %85	Reaktör B <sub>1</sub> , %58
Kekik Atığı	26,328	41,12	26,648	Reaktör C, %95	Reaktör C, %14
				Reaktör D, %93	Reaktör D, %12
Park-Bahçe Atığı	12,903	40,64	28,824	Reaktör E, %96	Reaktör E, %17
				Reaktör F, %94	Reaktör F, %12
Fındık Zürafu	6,45	47,167	33,959	Reaktör G, %95	Reaktör G, %24
				Reaktör H, %93	Reaktör H, %16

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biyokütle olarak bilinen tarımsal bitkisel atıklar yenilenebilir yakıtlardan sürdürülebilir enerji üretmek için önemli bir potansiyele sahiptir (FAO ve UNEP 2010). Lignoselülozik biyokütle kaynak geri kazanımı ve enerji için kullanılmak yerine, özellikle gelişmekte olan ülkelerde büyük bir kısmı açık alan yakılarak hava ve toprak kalitesinde bozulmaya yol açar ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir (Kapoor ve diğ. 2020). Tarımsal atıklar gibi lignoselülozik malzemeler, nispeten düşük maliyetler, yüksek mevcudiyeti, gıda ve yem üretimi ile doğrudan rekabeti olmaması nedeniyle biyometan üretimi için en uygun hammaddeler olarak yaygın olarak kabul edilmektedir (Shafiei ve diğ. 2013).

Lignoselülozik biyokütle olan ayçiçeği sapları, küresel olarak 78-182 milyon ton üretilmektedir ve tipik olarak çöp olarak atılır veya tarlalarda yakılarak çevre kirliliğine neden olur (Ruiz et al., 2013). Buna karşılık, ayçiçeği sapının yüksek selüloz ve hemiselüloz içeriği, biyometan üretimi için potansiyel bir hammadde haline getirir (Ziebell ve diğ. 2013). Ancak yüksek kristalli selüloz, doğal yapıda bir lignin ve hemiselüloz içeren ayçiçeği sapının anaerobik çürümesinde hidroliz hız sınırlayıcıdır ve metan üretimini olumsuz yönde etkilemektedir (Frigon ve Guiot, 2010).

Park-bahçe atıkları, biyolojik bozunmaya karşı dirençli tipik olarak selülozu aerobik bozunmasını önleyen ve yavaşlatan lignin veya yavaş / orta derecede bozunabilen hemiselüloz, selüloz gibi organik bileşikler içerir (Reyes-Torres ve diğ. 2018).

Fındık zürufu, fındığın büyüme sürecinde etrafını saran ve koruyan yeşilimsi bitki yapılarıdır. Hasat zamanında bu bitki yapısı fındıkla birlikte toplanır ve fabrikada fındıktan ayrıştırılarak atığa dönüştürülür. Dünya fındık üretiminin %73'üne ev sahipliği yapan Türkiye, dünyanın en büyük fındık üreticisidir (400.000–450.000 ton/yıl). Her yıl fındık hasadından sonra fındık atıkları yakılmakta veya tarlada bırakılmaktadır (Çöpür ve diğ. 2007). Fındık zürufu gibi lignoselülozik

malzeme içeren organik maddelerin anaerobik çürümesi uzun zaman alır ve verimsiz biyogaz üretir (Taherzadeh ve Jeihanipour 2012).

Bu çalışmada ayçiçeği sapı, kekik atığı, park-bahçe atığı ve fındık zürufu gibi zor parçalanabilir tarımsal atıkların biyobozunumuna kentsel organik katı atıkların ilave edilmesinin, bu atıkların kendi içinde farklı oranlarda karıştırılmasının veya tek başına parçalanmasının biyoreaktörlerde farklı işletme koşulları uygulanmasının etkisinin nasıl olduğunun incelenmesi ve metan üretiminin gözlenmesi gerçekleştirilmiştir. 10 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde 2,4 L hacime sahip 2 adet biyoreaktör kullanılmıştır. Atık karışımları reaktörlere yüklenmeden önce su muhtevası ve organik madde analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kullanılan tarımsal atıklarda selüloz, hemiselüloz ve lignin içerikleri analiz edilmiştir. Tablo 6.1’de biyoreaktörlerdeki KOİ giderim verimleri, oluşan toplam gaz miktarları, metan miktarı ve metan yüzdeleri toplu bir şekilde gösterilmiştir.

**Tablo 6.1:** Biyoreaktör sızıntı suyu analiz sonuçları

Atık Türü	KOİ Giderim Verimi (%)	Toplam Gaz Miktar (L)	Metan Miktarı (L)	Metan Yüzdesi (%)
Ayçiçeği sapı (Anaerobik)	Reaktör <sub>1</sub> ; %90	Reaktör <sub>1</sub> ; 12,42	Reaktör <sub>1</sub> ; 3,895	Reaktör <sub>1</sub> ; %34
	Reaktör <sub>2</sub> ; %97	Reaktör <sub>2</sub> ; 18,785	Reaktör <sub>2</sub> ; 8,13	Reaktör <sub>2</sub> ; %44
Ayçiçeği sapı (Semi-aerobik / anaerobik)	Reaktör A <sub>1</sub> ; %97	Reaktör A <sub>1</sub> ; 26,64	Reaktör A <sub>1</sub> ; 9,929	Reaktör A <sub>1</sub> ; %44
	Reaktör B <sub>1</sub> ; %94	Reaktör B <sub>1</sub> ; 39,6	Reaktör B <sub>1</sub> ; 15,351	Reaktör B <sub>1</sub> ; %47
Kekik Atığı	Reaktör C; %87	Reaktör C; 7,56	Reaktör C; 2,3	Reaktör C; %30,5
	Reaktör D; %75	Reaktör D; 6,84	Reaktör D; 1,968	Reaktör D; %27,5
Park-Bahçe Atığı	Reaktör E; %74	Reaktör E; 5,64	Reaktör E; 1,517	Reaktör E; %27
	Reaktör F; %68	Reaktör F; 4,68	Reaktör F; 1,126	Reaktör F; %24
Fındık Zürufu	Reaktör G; %96	Reaktör G; 6,84	Reaktör G; 2,88	Reaktör G; %52
	Reaktör H; %94	Reaktör H; 5,52	Reaktör H; 2,09	Reaktör H; %49

Ön deneme amaçlı ayçiçeği sapının farklı oranlarda organik fraksiyonlu evsel atıklarla karışımının anaerobik biyoreaktörlerde parçalanması ve metan üretimi incelenmiştir. Reaktörler 90 gün boyunca işletilmiştir. Yapılan analiz sonuçları doğrultusunda Reaktör<sub>1</sub>’de ve Reaktör<sub>2</sub>’de sırasıyla; %90 %97 KOİ giderimi, %84 %94 UYA giderimi, %76 %92 BOİ giderimi ve %43 ve %52’lik organik madde

giderimi sağlanmıştır. Kümülatif olarak hesaplanan toplam gaz miktarları Reaktör<sub>1</sub>'de ve Reaktör<sub>2</sub>'de sırasıyla; 12,42 L ve 18,875 L gaz ölçülmüştür. Kümülatif metan miktarları Reaktör<sub>1</sub>'de 3,895 L, Reaktör<sub>2</sub>'de 8,13 L ve metan yüzdesi Reaktör<sub>1</sub>'de %34, Reaktör<sub>2</sub>'de %44 olarak ölçülmüştür. Ayçiçeği sapının fazla olduğu reaktörde lignin ve selüloz içeriğinin yüksek olması sebebi ile parçalanma hızının evsel atığın fazla olduğu reaktöre göre daha yavaş olduğu gözlemlenmiştir. Bir sonraki işletme koşulu olan semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında oran olarak ayçiçeği sapının fazla olduğu reaktör seçilip semi-aerobik / anaerobik koşullarda parçalanması gözlemlenmiştir.

Semi-aerobik / anaerobik işletme koşullarında ayçiçeği sapı, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör A<sub>1</sub>'de %20 evsel + %80 ayçiçeği sapı oranında ve Reaktör B<sub>1</sub>'de ise %100 ayçiçeği olacak şekilde karıştırılarak biyoreaktörlerde parçalanması ve metan üretimi 90 gün boyunca gözlemlenmiştir. Reaktörler 41 gün boyunca kesikli olarak havalandırılıp 49 gün boyunca metan üretimi için anaerobik olarak işletilmiştir. Semi-aerobik işletme koşullarında Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub> sırasıyla; %86 %89 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. 90 günlük işletme süresi sonucunda Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub> sırasıyla; %97 %94 KOİ giderimi, %97 %93 BOİ giderimi ve %60 ve %58 organik madde giderimi gerçekleşmiştir. Kümülatif olarak hesaplanan toplam gaz miktarları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub> sırasıyla; 26,64 L ve 39,6 L gaz ölçülmüştür. Kümülatif metan miktarları Reaktör A<sub>1</sub> ve Reaktör B<sub>1</sub>'de sırasıyla; 9,929 L 15,351 L metan gazı ölçülmüştür ve reaktörlerdeki metan yüzdesi toplam gazın %44 ve %47'si metan gazıdır.

Kekik atığı, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör C'de %20 evsel + %80 kekik atığı oranında ve Reaktör D'de ise %100 kekik atığı olacak şekilde karıştırılarak semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde parçalanması ve metan üretimi 72 gün boyunca incelenmiştir. Reaktörleri 32 gün kesikli havalandırılıp ardından metan üretilmesi amacı ile 40 gün anaerobik olarak işletilmiştir. Semi-aerobik işletme koşullarında Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla; %70 %57 KOİ giderimi gerçekleşmiştir. 72 günlük işletme süresi sonucunda Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla; %87 %75 KOİ giderimi, %86 %69 BOİ giderimi ve %14 %12 organik madde giderimi sağlanmıştır. Kümülatif toplam gaz miktarları Reaktör C ve Reaktör D'de sırasıyla; 7,56 L ve 6,84 L gaz ölçülmüştür. Kümülatif metan

miktarları Reaktör C ve Reaktör D’de sırasıyla; 2,3 L ve 1,968 L metan gazı ölçülmüştür ve reaktörlerdeki metan yüzdesi toplam gazın %30,5 ve %27,5’i metan gazıdır.

Park-bahçe atıkları, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör E’de %20 evsel + %80 park-bahçe atığı oranında, Reaktör F’de ise %100 park-bahçe atığı olacak şekilde karıştırılıp semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 75 gün boyunca işletilmiştir. Reaktörler 32 gün boyunca kesikli olarak havalandırılıp 43 gün boyunca anaerobik olarak işletilmiştir. Semi-aerobik işletme koşullarında Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla; %35 %37 KOİ giderimi sağlanmıştır. 75 günlük işletme periyodu sonucunda Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla; %74 %68 KOİ giderimi, %79 %69 BOİ giderimi ve %17 ve %12 organik madde giderilmiştir. Kümülatif toplam gaz miktarı Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla; 5,64 L ve 4,68 L gaz ölçülmüştür. Kümülatif metan miktarları Reaktör E ve Reaktör F’de sırasıyla; 1,517 L v 1,126 metan yüzdesi toplam gazın %27’si ve Reaktör %24’ü metan gazıdır.

Fındık zürufu, organik fraksiyonlu evsel atıklarla Reaktör G’de %20 evsel + %80 fındık zürufu oranında ve Reaktör H’de ise %100 fındık zürufu olacak şekilde karıştırılarak semi-aerobik / anaerobik biyoreaktörlerde 50 gün boyunca işletilmiştir. İşletme periyodunun ilk 22 günü reaktör kesikli havalandırılıp ardından 28 gün anaerobik olarak işletilmiştir. Semi-aerobik koşullarda Reaktör G ve Reaktör H’de sırasıyla; %73 %80 KOİ giderimi sağlanmıştır. Bunun nedeni aerobik prosesin avantajlarından biri olan hidroliz ve asitleşme safhasının anaerobik prosese göre daha hızlı olmasıdır. Bu süreç ayçiçeği sapı, kekik atığı ve park-bahçe atıklarına göre daha hızlı gerçekleştiğinden reaktöre yüklenen organik atıklar parçalanıp daha hızlı bir şekilde sızıntı suyuna geçmiş, daha kısa sürelerde stabilizasyon sağlanmış ve sistemin anaerobik işletme sürecine 28 gün devam edilmiştir. 50 günlük işletme periyodu sonucunda Reaktör G ve Reaktör H’de sırasıyla; %96 %94 KOİ giderimi, %92 BOİ giderimi ve %24 %16 organik madde giderimi gerçekleşmiştir. Kümülatif toplam gaz miktarı Reaktör G ve Reaktör H’de sırasıyla; 6,84 L ve 5,52 L gaz ölçülmüştür. Kümülatif metan gazı Reaktör G ve Reaktör H’de sırasıyla; 2,88 L ve 2,09 L metan gazı ölçülmüş ve toplam gazın %52 ve %49’u metan gazıdır.

Tarımsal atıkların yüksek lignin ve selüloz içeriğine sahip olması nedeniyle parçalanma süreci anaerobik arıtma yöntemleri ile uzun safhalarda

gerçekleşmektedir. Bu yüzden tarımsal atıkların parçalanma sürecini hızlandırmak için bir ön aerobik arıtma ile parçalanması sağlanıp ardından metan üretimi için anaerobik olarak işletilmesinin atıkların parçalanma sürecine katkı sağladığı belirlenmiştir.



## 7. KAYNAKLAR

Akırmak, E., "Tarımsal atık şeker pancarı küspesi ile sürekli çalışan dolgulu kolonda tekli ve ikili boyarmadde ve metal gideriminin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, (2010).

Álvarez, C., Colón, J., López, A. C., Fernández-Polanco, M., Benbelkacem, H., and Buffière, P., "Hydrodynamics of high solids anaerobic reactor: Characterization of solid segregation and liquid mixing pattern in a pilot plant VALORGA facility under different reactor geometry", *Waste Management*, 76, 306–314, (2018).

Amiri, H., and Karimi, K., "Autohydrolysis: A promising pretreatment for the improvement of acetone, butanol, and ethanol production from woody materials", *Chemical Engineering Science*, 137, 722–729, (2015).

Anderson, G. K., and Yang, G., "Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration", *Water Environment Research*, 64(1), 53–59, (1992).

Angle, J. C., Morin, T. H., Solden, L. M., Narrowe, A. B., Smith, G. J., Borton, M. A., Rey-Sanchez, C., Daly, R. A., Mirfenderesgi, G., Hoyt, D. W., Riley, W. J., Miller, C. S., Bohrer, G., and Wrighton, K. C., "Methanogenesis in oxygenated soils is a substantial fraction of wetland methane emissions", *Nature Communications*, 8(1), 1567, (2017).

APPA-AWWA-WEF, *Standart Methods for the Examination Water and Wastewater*. 18th ed., APPA-AWWA-WEF, American Public Health Association, Washington DC, USA, (1992)

Arafat, H. A., Jijakli, K., and Ahsan, A., "Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment", *Journal of Cleaner Production*, 105, 233–240, (2015).

Avcı, M., Aydın, S. S., Can, B., Daş, B., Denek, N., ve Savrunlu, M., "Kimi kaba yemlerde farklı bitki yapraklarının in vitro metan üretimi üzerine etkisi", *Harran Üniv. Vet. Fak.Dergisi*, 3(2)(2), 59–66, (2014).

Bary, A. I., Cogger, C. G., Sullivan, D. M., and Myhre, E. A., "Characterization of fresh yard trimmings for agricultural use", *Bioresource Technology*, 96(13), 1499–1504, (2005).

Beydilli, M. I., Pavlostathis, S. G., and Tincher, W. C., "Decolorization and toxicity screening of selected reactive azo dyes under methanogenic conditions" *Water Science and Technology*, 38(4–5), 225–232, (1998).

Bhuvaneshwari, S., Hettiarachchi, H., and Meegoda, J. N., "Crop Residue Burning in India: Policy Challenges and Potential Solutions", In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 16, Issue 5), (2019).

Bilgili, M. S., Demir, A., and Özkaya, B., "Influence of leachate recirculation on

aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes", *Journal of Hazardous Materials*, 143(1–2), 177–183, (2007).

Brown, D., Shi, J., and Li, Y., "Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production", *Bioresource Technology*, 124, 379–386, (2012).

Cao, L., Zhang, C., Chen, H., Tsang, D. C. W., Luo, G., Zhang, S., and Chen, J., "Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects", *Bioresource Technology*, 245, 1184–1193, (2017).

Campman, C., Yates, A., "Bioreactor Landfills: An idea whose time has come", *MSW Management*, (2002).

Ceylan, S., and Topçu, Y., "Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis", *Bioresource Technology*, 156, 182–188, (2014).

Chakma, S., and Mathur, S., "Modelling gas generation for landfill", *Environmental Technology*, 38(11), 1435–1442, (2017).

Chakraborty, D., and Venkata Mohan, S., "Effect of food to vegetable waste ratio on acidogenesis and methanogenesis during two-stage integration", *Bioresource Technology*, 254, 256–263 (2018).

Chandler, J. A., and Jewell, W. J., "Predicting methane fermentation biodegradability", *Final report*, (1980).

Charles, W., Walker, L., and Cord-Ruwisch, R., "Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste", *Bioresource Technology*, 100(8), 2329–2335, (2009).

Chen, D., Yin, L., Wang, H., and He, P., "Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review", *Waste Management*, 34(12), 2466–2486, (2014).

Chen, X., Yan, W., Sheng, K., and Sanati, M. "Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste", *Bioresource Technology*, 154, 215–221, (2014).

Cheng, J.-R., Liu, X.-M., and Chen, Z.-Y., "Methane Production from Rice Straw Hydrolysate Treated with Dilute Acid by Anaerobic Granular Sludge", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(1), 9–20, (2016).

Chiumenti, A., Boscaro, D., Da Borso, F., Sartori, L., and Pezzuolo, A., "Biogas from Fresh Spring and Summer Grass: Effect of the Harvesting Period", *Energies*, 11(6), (2018).

Çöpür, Y., Güler, C., Akgül, M., and Taşçıoğlu, C., "Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production", *Building and Environment*, 42(7), 2568–2572, (2007).

Cossu, R., Morello, L., Raga, R., and Cerminara, G., "Biogas production enhancement using semi-aerobic pre-aeration in a hybrid bioreactor landfill", *Waste Management*, 55, 83–92, (2016).

Cossu, R., Raga, R., and Rossetti, D., "The PAF model: an integrated approach for landfill sustainability", *Waste Management*, 23(1), 37–44, (2003).

Cucina, M., Pezzolla, D., Tacconi, C., and Gigliotti, G., "Anaerobic co-digestion of a lignocellulosic residue with different organic wastes: Relationship between biomethane yield, soluble organic matter and process stability", *Biomass and Bioenergy*, 153(July), 106209, (2021).

Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., and Jouhara, H., "Potential of pyrolysis processes in the waste management sector", *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 171–197, (2017).

Çolakoglu, B., "Tarımsal Atıkların Alternatif Kullanım Alanları Konusunda Üretici Eğilimler", Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tarım Ekonomisi Anabilim Dalı, (2018).

Damgaard, A., Riber, C., Fruergaard, T., Hulgaard, T., and Christensen, T. H., "Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration", *Waste Management*, 30(7), 1244–1250, (2010).

De Lacroix, H. F., DesBOis, S., and Saint-Joly, C., " Anaerobic digestion of municipal solid organic waste: Valorga full-scale plant in Tilburg, The Netherlands", *Water Science and Technology*, 36(6–7), 457–462, (1997).

de Souza, J. B., Michelin, M., Amâncio, F. L. R., Vital Brazil, O. A., Polizeli, M. de L. T. M., Ruzene, D. S., Silva, D. P., Mendonça, M. da C., and López, J. A., "Sunflower stalk as a carbon source inductive for fungal xylanase production.", *Industrial Crops and Products*, 153, 112368, (2020).

DeAbreu, R., "Facultative Bioreactor Landfill: An Environmental and Geotechnical Study", (2003).

Deublein, D., and Steinhauser, A., "Biogas from Waste and Renewable Resources", (2011).

Dhamodharan, K., Kumar, V., and Kalamdhad, A. S., "Effect of different livestock dungs as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics", *Bioresource Technology*, 180, 237–241, (2015).

Di Maria, F., and Micale, C., "Analysis of the Energetic Potential Generable from an Hybrid Bioreactor Landfill for Waste Organic Fraction", *Energy Procedia*, 81, 282–287, (2015).

Doğan, M., "Enerji Kaynakları, Çevre Sorunları ve Çevre Dostu Alternatif Enerji Kaynakları Standard Dergisi", 39/468 S28-3610, (2000).

dos Santos Filho, D. A., Oliveira, L. R. G., Fraga, T. J. M., da Motta Sobrinho, M. A., and Jucá, J. F. T., "Development of a horizontal reactor with radial agitation to synthesize bio-methane from biomass waste and domestic sewage sludge", *Journal of Cleaner Production*, 257, 120616, (2020).

Dumlu, L., Ciggin, A. S., Ručman, S., and Altınay Perendeci, N., "Pretreatment, anaerobic codigestion, or both? Which is more suitable for the enhancement of methane production from agricultural waste?" *Molecules*, 26(14), (2021).

Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., and Camacho-Ferre, F., "Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives

- on alternative uses", *Global Ecology and Conservation*, 22, e00902, (2020).
- Eades, P., Kusch-Brandt, S., Heaven, S., and Banks, C. J., "Estimating the generation of gardenwaste in England and the differences between rural and urban areas", *Resources*, 9(1), 1–23, (2020).
- Energy, U.N., "A Decision support tool for sustainable bioenergy" *Prepared by FAO and UNEP for UN Energy*, (2010).
- Erses, A. S., Onay, T. T., and Yenigun, O., "Comparison of aerobic and anaerobic degradation of municipal solid waste in bioreactor landfills", *Bioresource Technology*, 99(13), 5418–5426, (2008).
- Eskicioğlu, A.V., "Bitkisel Atıklardan Kompost Gübre Üretim Sisteminin Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2013).
- Fang, K., Zhou, Y., Wang, S., Ye, R., and Guo, S., "Assessing national renewable energy competitiveness of the G20: A revised Porter's Diamond Model", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 719–731, (2018).
- Frigon, J.-C., and Guiot, S. R., "Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review", *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(4), 447–458, (2010).
- Ganesh, K. S., Sridhar, A., and Vishali, S., "Utilization of fruit and vegetable waste to produce value-added products: Conventional utilization and emerging opportunities-A review", *Chemosphere*, 287, 132221, (2022).
- Gao, Y., Wang, H., Guo, J., Peng, P., Zhai, M., and She, D., "Hydrothermal degradation of hemicelluloses from triploid poplar in hot compressed water at 180–340 °C", *Polymer Degradation and Stability*, 126, 179–187, (2016).
- Ge, S., Liu, L., Xue, Q., and Yuan, Z., "Effects of exogenous aerobic bacteria on methane production and biodegradation of municipal solid waste in bioreactors", *Waste Management*, 55, 93–98, (2016).
- Ghaffar, S. H., and Fan, M., "Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw", *Biomass and Bioenergy*, 57, 264–279, (2013).
- Graça, J., Murphy, B., Pentlavalli, P., Allen, C. C. R., Bird, E., Gaffney, M., Duggan, T., and Kelleher, B., "Bacterium consortium drives compost stability and degradation of organic contaminants in in-vessel composting process of the mechanically separated organic fraction of municipal solid waste (MS-OFMSW)", *Bioresource Technology Reports*, 13, 100621, (2021).
- Gu, Y., Chen, X., Liu, Z., Zhou, X., and Zhang, Y., "Effect of inoculum sources on the anaerobic digestion of rice straw", *Bioresource Technology*, 158, 149–155, (2014).
- Guendehou, G. H. S., Koch, M., Hockstad, L., Pipatti, R., and Yamada, M., "Incineration and Open Burning of Waste", *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste*, 5, 1–26, (2006).
- Gündüzalp, AA., Güven S., "Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği", *Hacettepe Üniversitesi*,

Sosyolojik Araştırmalar, e-dergi, (2016).

Han, Z., Zeng, D., Mou, Z., Shi, G., Zhang, Y., and Lou, Z., "A novel spatiotemporally anaerobic/semi-aerobic bioreactor for domestic solid waste treatment in rural areas", *Waste Management*, 86, 97–105, (2019).

Harmankaya, M., "Impacts of sewage sludge codisposal on waste degradation in aerobic and anaerobic bioreactors", Yüksek Lisans Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Çevre Teknolojisi*, İstanbul, (2013).

Hasan, M. M., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., and Jahirul, M. I., "Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111073, (2021).

He, K., Zhang, J., and Zeng, Y., "Knowledge domain and emerging trends of agricultural waste management in the field of social science: A scientometric review", *Science of The Total Environment*, 670, 236–244, (2019).

Hla, S. S., and Roberts, D., "Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia" *Waste Management*, 41, 12–19, (2015).

Hobbs, S. R., Landis, A. E., Rittmann, B. E., Young, M. N., and Parameswaran, P., "Enhancing anaerobic digestion of food waste through biochemical methane potential assays at different substrate: inoculum ratios" *Waste Management*, 71, 612–617, (2018).

Hot, E., "Investigation of waste stabilization potential of a medium aged solid waste in a bioreactor landfill", Yüksek Lisans Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Çevre Teknolojisi*, İstanbul, (2012).

HUANG, Q., YANG, Y., PANG, X., and WANG, Q., "Evolution on qualities of leachate and landfill gas in the semi-aerobic landfill", *Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 499–504, (2008).

Isibika, A., Vinnerås, B., Kibazohi, O., Zurbrügg, C., and Lalander, C., "Co-composting of banana peel and orange peel waste with fish waste to improve conversion by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae", *Journal of Cleaner Production*, 318, 128570, (2021).

Jain, M. S., Daga, M., and Kalamdhad, A. S., "Physical parameters evaluation during production of soil conditioner from aquatic waste: *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle", *Environmental Technology and Innovation*, 11, 64–73, (2018).

Jamil, F., Aslam, M., Al-Muhtaseb, A. H., Bokhari, A., Rafiq, S., Khan, Z., Inayat, A., Ahmed, A., Hossain, S., Khurram, M. S., and Abu Bakar, M. S., "Greener and sustainable production of bioethylene from bioethanol: current status, opportunities and perspectives", *Reviews in Chemical Engineering*, (2020).

Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Gavilanes-Terán, I., López, M., Marhuenda-Egea, F. C., Brito, H., and Moral, R., "Development of organic fertilizers from food market waste and urban gardening by composting in Ecuador", *PLoS ONE*, 12(7), 1–10, (2017).

- Jara-Samaniego, J., Pérez-Murcia, M. D., Bustamante, M. A., Pérez-Espinosa, A., Paredes, C., López, M., López-Lluch, D. B., Gavilanes-Terán, I., and Moral, R., "Composting as sustainable strategy for municipal solid waste management in the Chimborazo Region, Ecuador: Suitability of the obtained composts for seedling production", *Journal of Cleaner Production*, *141*, 1349–1358, (2017).
- Johnke, B., Emissions From Waste Incineration, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 455–468, (2012).
- Jorgensen, H., and Kristensen, J. B., "Claus Enzymatic conversion of Felbylignocellulose into ferm entable sugars: chal, lenges and opportunities", *Biofuels, Bioproducts and Biore—Fining*, *1*, 1–19, (2007).
- Jun, D., Yongsheng, Z., Henry, R. K., and Mei, H., "Impacts of aeration and active sludge addition on leachate recirculation bioreactor", *Journal of Hazardous Materials*, *147*(1–2), 240–248, (2007).
- Kainthola, J., Kalamdhad, A. S., and Goud, V. V., "Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis", *Biomass and Bioenergy*, *125*, 8–16, (2019).
- Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., Sengupta, S., Gupta, A., Kumar, S. S., Vijay, V., Kumar, V., Kumar Vijay, V., and Pant, D., "Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook", *Bioresource Technology*, *304*, 123036, (2020).
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Sung, S., Raskin, L., and Khanal, S. K., "Anaerobic co-digestion of various organic wastes: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation" In *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd., (2021).
- Khiari, Z., Kaluthota, S., and Savidov, N., "Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization", *Aquaculture*, *500*, 492–499, (2019).
- Khiari, Z., Kaluthota, S., and Savidov, N., "Phosphorus delays the onset of nitrification during aerobic digestion of aquaculture/aquaponic solid waste", *Biochemical Engineering Journal*, *155*, 107493, (2020).
- Kim, H., Ahn, Y., and Kwak, S. Y., "Comparing the influence of acetate and chloride anions on the structure of ionic liquid pretreated lignocellulosic biomass", *Biomass and Bioenergy*, *93*, 243–253, (2016).
- Kim, J., Park, C., Kim, T.-H., Lee, M., Kim, S., Kim, S.-W., and Lee, J., "Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *95*(3), 271–275, (2003).
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., and Christensen, T. H., "Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *32*(4), 297–336, (2002).
- Ko, J. H., Ma, Z., Jin, X., and Xu, Q., "Effects of aeration frequency on leachate quality and waste in simulated hybrid bioreactor landfills", *Journal of the Air \and Waste Management Association*, *66*(12), 1245–1256, (2016).
- Koçer Nacar, N., and Ayhan, Ü., "Doğu Anadolu Bölgesinin Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, *7*, (2007).

- Köse, E. T., and Demir, İ., "Leachate characterization in bioreactor landfill areas", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3), 1455–1468, (2020).
- Kumar, S., Chiemchaisri, C., and Mudhoo, A., " Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: An overview", *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(1), 77–97, (2011).
- Lalremruati, M., and Devi, A. S., "Changes in physico-chemical properties during composting of three common household organic solid wastes amended with garden soil", *Bioresource Technology Reports*, 15, 100727, (2021).
- Lee, E., Bittencourt, P., Casimir, L., Jimenez, E., Wang, M., Zhang, Q., and Ergas, S. J., "Biogas production from high solids anaerobic co-digestion of food waste, yard waste and waste activated sludge", *Waste Management*, 95, 432–439, (2019).
- Li, S., Xu, S., Liu, S., Yang, C., and Lu, Q., "Fast pyrolysis of biomass in free-fall reactor for hydrogen-rich gas", *Fuel Processing Technology*, 85(8–10), 1201–1211, (2004).
- Li, W., Sun, Y., Wang, H., and Wang, Y., "Improving leachate quality and optimizing CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a pre-aerated semi-aerobic bioreactor landfill using different pre-aeration strategies", *Chemosphere*, 209, 839–847, (2018).
- Li, Y., Zhang, R., Liu, X., Chen, C., Xiao, X., Feng, L., He, Y., and Liu, G., "Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co-digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure", *Energy and Fuels*, 27(4), 2085–2091, (2013).
- Lim, S. L., Lee, L. H., and Wu, T. Y., "Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis" *Journal of Cleaner Production*, 111, 262–278, (2016).
- Lin, Y., Ge, X., and Li, Y., "Solid-state anaerobic co-digestion of spent mushroom substrate with yard trimmings and wheat straw for biogas production", *Bioresource Technology*, 169, 468–474, (2014).
- Liu, B., and Rajagopal, D., "Life-cycle energy and climate benefits of energy recovery from wastes and biomass residues in the United States", *Nature Energy*, 4(8), 700–708, (2019).
- Lizasoain, J., Rincón, M., Theuretzbacher, F., Enguídanos, R., Nielsen, P. J., Potthast, A., Zweckmair, T., Gronauer, A., and Bauer, A., "Biogas production from reed biomass: Effect of pretreatment using different steam explosion conditions", *Biomass and Bioenergy*, 95, 84–91, (2016).
- Loehr, R. C., "Hazardous solid waste from agriculture", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 27 (December), 261–273, (1978).
- Long, Y., Long, Y. Y., Liu, H. C., and Shen, D. S., "Degradation of Refuse in Hybrid Bioreactor Landfill", *Biomedical and Environmental Sciences*, 22(4), 303–310, (2009).
- Luo, S., and Weng, Y., "A two-stage supervised learning approach for electricity price forecasting by leveraging different data sources", *Applied Energy*, 242

(November 2018), 1497–1512, (2019).

Mali Sandip, T., Khare Kanchan, C., and Biradar Ashok, H., "Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill", *Bioresource Technology*, 110, 10–17, (2012).

Manzur, S. R., Hossain, M. S., Kemler, V., and Khan, M. S., "Monitoring extent of moisture variations due to leachate recirculation in an ELR/bioreactor landfill using resistivity imaging", *Waste Management*, 55, 38–48, (2016).

Mertoğlu, B., "Investigation of microbial communities in sanitary and bioreactor landfills", Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Programı, İstanbul*, (2005).

Morello, L., Raga, R., Lavagnolo, M. C., Pivato, A., Ali, M., Yue, D., and Cossu, R., "The S.An.A.® concept: Semi-aerobic, Anaerobic, Aerated bioreactor landfill", *Waste Management*, 67, 193–202, (2017).

Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., and Li, A., " Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogas production", *Science of The Total Environment*, 704, 135429, (2020).

Munawar, E., Yunardi, Y., Lederer, J., and Fellner, J., "The development of landfill operation and management in Indonesia", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(2), 1128–1142, (2018).

Mussatto, S. I., and Dragone, G. M., "Biomass Pretreatment, Biorefineries, and Potential Products for a Bioeconomy Development", *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*, 1–22, (2016).

Nacry, P., Bouguyon, E., and Gojon, A., " Nitrogen acquisition by roots: physiological and developmental mechanisms ensuring plant adaptation to a fluctuating resource", *Plant and Soil*, 370(1), 1–29, (2013).

Nag, M., Shimaoka, T., and Komiya, T., "Impact of intermittent aerations on leachate quality and greenhouse gas reduction in the aerobic–anaerobic landfill method", *Waste Management*, 55, 71–82, (2016).

Nagendran, R., "Agricultural Waste and Pollution", *Waste*, 341–355, (2011).

Nations, U., The millennium development goals report. *New York: United Nations*, (2015).

Neyim, C., Türkiye'de Eysel Nitelikli Katı Atıklar, Çevre Koruma Ve Ambalaj Atıkları Değerlendirme Vakfı (ÇEVKO), Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma Tematik Paneli, İstanbul, (2008).

Nguyen, D., and Khanal, S. K., "A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process", *Biotechnology Advances*, 36(7), 1971–1983, (2018).

Nwaokorie, K. J., Bareither, C. A., Mantell, S. C., and Leclaire, D. J., "The influence of moisture enhancement on landfill gas generation in a full-scale landfill", *Waste Management*, 79, 647–657, (2018).

Öztürk, İ., *Katı Atık Yönetim ve AB Uygulamaları*, İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi 2, İstanbul, (2010).

Panigrahi, S., Sharma, H. B., and Dubey, B. K., "Anaerobic co-digestion of food waste with pretreated yard waste: A comparative study of methane production, kinetic modeling and energy balance", *Journal of Cleaner Production*, 243, 118480, (2020).

Parawira, W., Read, J. S., Mattiasson, B., and Björnsson, L., "Energy production from agricultural residues: High methane yields in pilot-scale two-stage anaerobic digestion", *Biomass and Bioenergy*, 32(1), 44–50, (2008).

Pellera, F. M., Pasparakis, E., and Gidarakos, E., "Consecutive anaerobic-aerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste and lignocellulosic materials in laboratory-scale landfill-bioreactors", *Waste Management*, 56, 181–189, (2016).

Peng, J. F., Song, Y. H., Wang, Y. L., Yuan, P., and Liu, R., "Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor.", *International Biodeterioration and Biodegradation*, 80, 60–65, (2013).

Pham, T. P. T., Kaushik, R., Parshetti, G. K., Mahmood, R., and Balasubramanian, R., "Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions", *Waste Management*, 38(1), 399–408, (2015).

Phuttaro, C., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., Boonsawang, P., Chairapat, S., and Khanal, S. K., "Anaerobic digestion of hydrothermally-pretreated lignocellulosic biomass: Influence of pretreatment temperatures, inhibitors and soluble organics on methane yield", *Bioresource Technology*, 284, 128–138, (2019).

Pietronave, S., Fracchia, L., Rinaldi, M., and Martinotti, M. G., "Influence of biotic and abiotic factors on human pathogens in a finished compost", *Water Research*, 38(8), 1963–1970, (2004).

Razo-Flores, E., Luijten, M., Donlon, B., Lettinga, G., and Field, J., "Biodegradation of selected azo dyes under methanogenic conditions", *Water Science and Technology*, 36(6–7), 65–72, (1997).

Read, A. D., Hudgins, M., Harper, S., Phillips, P., and Morris, J., "The successful demonstration of aerobic landfilling: The potential for a more sustainable solid waste management approach?", *Resources, Conservation and Recycling*, 32(2), 115–146, (2001).

Rehrah, D., Bansode, R. R., Hassan, O., and Ahmedna, M., "Physico-chemical characterization of biochars from solid municipal waste for use in soil amendment", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 118, 42–53, (2016).

Reinhart, D. R., McCreanor, P. T., and Townsend, T., "The bioreactor landfill: Its status and future", *Waste Management and Research*, 20(2), 172–186, (2002).

Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., and Sánchez, A., "A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies", *Waste Management*, 77, 486–499, (2018).

Rich, C., Gronow, J., and Voulvoulis, N., "The potential for aeration of MSW landfills to accelerate completion", *Waste Management (New York, N.Y.)*, 28, 1039–

1048, (2008).

Rittmann, B. E., and McCarty, P. L., "Environmental Biotechnology: Principles and Applications (First edit)", McGraw-Hill Education, (2001).

Ruiz, E., Romero, I., Moya, M., Cara, C., Vidal, J. D., and Castro, E., "Dilute sulfuric acid pretreatment of sunflower stalks for sugar production", *Bioresource Technology*, *140*, 292–298, (2013).

Sambusiti, C., Ficara, E., Rollini, M., Manzoni, M., and Malpei, F., "Sodium hydroxide pretreatment of ensiled sorghum forage and wheat straw to increase methane production", *Water Science and Technology*, *66*(11), 2447–2452, (2012).

Sang, N. N., Soda, S., Inoue, D., Sei, K., and Ike, M., "Effects of intermittent and continuous aeration on accelerative stabilization and microbial population dynamics in landfill bioreactors", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *108*(4), 336–343, (2009).

Sang, N. N., Soda, S., Ishigaki, T., and Ike, M., "Microorganisms in landfill bioreactors for accelerated stabilization of solid wastes", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *114*(3), 243–250, (2012).

Sayar, Ş., " Sakarya İli Entegre Atık Yönetimi ve Ambalaj Atıklarının Geri Dönüşümü", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi*, (2012).

Scherzinger, M., and Kaltschmitt, M., "Thermal pre-treatment options to enhance anaerobic digestibility – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *137*, 110627, (2021).

Schnürer, A., and Nordberg, Å., "Ammonia, a selective agent for methane production by syntrophic acetate oxidation at mesophilic temperature", *Water Science and Technology*, *57*(5), 735–740, (2008).

Sekman, E., Top, S., Varank, G., and Bilgili, M. S., "Pilot-scale investigation of aeration rate effect on leachate characteristics in landfills", *Fresenius Environmental Bulletin*, *20*(7 A), 1841–1852, (2011).

Shafiei, M., Kabir, M. M., Zilouei, H., Sárvári Horváth, I., and Karimi, K., "Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment", *Bioresource Technology*, *148*, 53–60, (2013).

Shen, J., Zheng, Q., Zhang, R., Chen, C., and Liu, G., "Co-pretreatment of wheat straw by potassium hydroxide and calcium hydroxide: Methane production, economics, and energy potential analysis", *Journal of Environmental Management*, *236*, 720–726, (2019).

Slezak, R., Krzystek, L., and Ledakowicz, S., " Degradation of municipal solid waste in simulated landfill bioreactors under aerobic conditions", *Waste Management*, *43*, 293–299, (2015).

Son, C. R. I. M., Salim, N. S., Singh, A., and Raghavan, V., "Potential Utilization of Fruit and Vegetable Wastes for Food through Drying or Extraction Techniques" *J*, *1*(2), 15–27, (2017).

Sosa Sabogal, O., Valin, S., Thiery, S., and Salvador, S., "Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste",

*Chemical Engineering Research and Design*, 173, 206–214, (2021).

Speece, R., "Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment" ,*Environ. Sci. Technol.*, 17, (1996).

Speight, J. G. (Ed.), "*The Biofuels Handbook*. The Royal Society of Chemistry", (2011).

Sponza, D. T., and Ağdağ, O. N., "Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors", *Process Biochemistry*, 39(12), 2157–2165, (2004).

Srivastava, A. N., and Chakma, S., "Investigating leachate decontamination and biomethane augmentation through Co-disposal of paper mill sludge with municipal solid waste in simulated anaerobic landfill bioreactors", *Bioresource Technology*, 329, 124889, (2021).

Sun, L., Pope, P. B., Eijssink, V. G. H., and Schnürer, A., "Characterization of microbial community structure during continuous anaerobic digestion of straw and cow manure", *Microbial Biotechnology*, 8(5), 815–827, (2015).

Sun, Y., Sun, X., and Zhao, Y., "Comparison of semi-aerobic and anaerobic degradation of refuse with recirculation after leachate treatment by aged refuse bioreactor", *Waste Management*, 31(6), 1202–1209, (2011).

Sun, Z., Fridrich, B., De Santi, A., Elangovan, S., and Barta, K., "Bright Side of Lignin Depolymerization: Toward New Platform Chemicals", *Chemical Reviews*, 118(2), 614–678, (2018).

Sutthasil, N., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Wangyao, K., Endo, K., Ishigaki, T., and Yamada, M., "The effectiveness of passive gas ventilation on methane emission reduction in a semi-aerobic test cell operated in the tropics", *Waste Management*, 87, 954–964, (2019).

Şanlı, S.K., "Farklı tarımsal artıkların pleurotus eryngii mantar üretiminde kullanım olanakları", *Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, (2014).

T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Resmi Gazete, Tarih: 26.03.2010, Sayı: 27533, (2010).

ten Hoeve, M., Bruun, S., Jensen, L. S., Christensen, T. H., and Scheutz, C., "Life cycle assessment of garden waste management options including long-term emissions after land application", *Waste Management*, 86, 54–66, (2019).

Teodorita Al Seadi, Domiik Rutz, Heinz Prassl, Michael Kottner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, R. J., "*Downloaded from <http://lemvigbiogas.com/>*", (2008).

Themelis, N. J., and Ulloa, P. A., "Methane generation in landfills" *Renewable Energy*, 32(7), 1243–1257, (2007).

Theng, L. C., Matsufuji, Y., and Mohd, N. H., "Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis" *Waste Management*, 25(7), 702–711, (2005).

- Thi, N. B. D., Kumar, G., and Lin, C. Y., "An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective", *Journal of Environmental Management*, 157, 220–229, (2015).
- Toptas, P., and Erses Yay, A. S., "Kesikli-Aerobik, Hibrit ve Anaerobik Arıtma Yöntemlerinin Atık Yönetiminde Kullanılması", *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, November, 15–15, (2017).
- Tyagi, V. K., Fdez-Güelfo, L. A., Zhou, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., and Ng, W. J., "Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 380–399, (2018).
- Uludag-Demirer, S., Demirer, G. N., Frear, C., and Chen, S., "Anaerobic digestion of dairy manure with enhanced ammonia removal", *Journal of Environmental Management*, 86(1), 193–200, (2008).
- Van Dyk, J. S., and Pletschke, B. I., "A review of lignocellulose bioconversion using enzymatic hydrolysis and synergistic cooperation between enzymes—Factors affecting enzymes, conversion and synergy", *Biotechnology Advances*, 30(6), 1458–1480, (2012).
- Veluchamy, C., and Kalamdhad, A. S., "A mass diffusion model on the effect of moisture content for solid-state anaerobic digestion", *Journal of Cleaner Production*, 162, 371–379, (2017).
- Venkateshwaran, K., Bocher, B., Maki, J., and Zitomer, D., "Relating Anaerobic Digestion Microbial Community and Process Function", *Microbiology Insights*, 8(Suppl 2), 37–44, (2016).
- Wang, Y., Li, L., Qiu, Z., Yang, K., Han, Y., Chai, F., Li, P., and Wang, Y., "Trace volatile compounds in the air of domestic waste landfill site: Identification, olfactory effect and cancer risk", *Chemosphere*, 272, 129582, (2021).
- Wang, Z., Lei, T., Yang, M., Li, Z., Qi, T., Xin, X., He, X., Ajayebi, A., and Yan, X., "Life cycle environmental impacts of cornstalk briquette fuel in China", *Applied Energy*, 192, 83–94, (2017).
- Warith, M., "Bioreactor landfills: experimental and field results", *Waste Management*, 22(1), 7–17, (2002).
- Warith, M., "Solid waste management: New trends in landfill design", *Emirates Journal of Engineering Research*, 8, (2003).
- Xu, Q., Qin, J., Yuan, T., and Ko, J. H., "Extracellular enzyme and microbial activity in MSW landfills with different gas collection and leachate management practices", *Chemosphere*, 250, 126264, (2020).
- Xu, Q., Tian, Y., Wang, S., and Ko, J. H., "A comparative study of leachate quality and biogas generation in simulated anaerobic and hybrid bioreactors", *Waste Management*, 41, 94–100, (2015).
- Yıldız, Ş., Ölmez, E., ve Kiriş, A., "Kompost teknolojileri ve İstanbul'daki uygulamaları", *Kompostlaştırma Sistemleri ve Kompostun Kullanım Alanları Çalıştayı*, 1–12, (2009).

Yu, Z., and Schanbacher, F. L., "Production of Methane Biogas as Fuel Through Anaerobic Digestion BT ", *Sustainable Biotechnology: Sources of Renewable Energy* (O. V Singh and S. P. Harvey (Eds.); pp. 105–127). Springer Netherlands, (2010).

Zhang, Q., Zhang, D., Xu, H., Lu, W., Ren, X., Cai, H., Lei, H., Huo, E., Zhao, Y., Qian, M., Lin, X., Villota, E. M., and Mateo, W., "Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: Towards maximizing the utilization of agricultural wastes", *Industrial Crops and Products*, 146, 112185, (2020).

Zhao, X., Musleh, R., Maher, S., Khire, M. V., Voice, T. C., and Hashsham, S. A., "Start-up performance of a full-scale bioreactor landfill cell under cold-climate conditions", *Waste Management*, 28(12), 2623–2634, (2008).

Ziebell, A. L., Barb, J. G., Sandhu, S., Moyers, B. T., Sykes, R. W., Doepcke, C., Gracom, K. L., Carlile, M., Marek, L. F., Davis, M. F., Knapp, S. J., and Burke, J. M., "Sunflower as a biofuels crop: An analysis of lignocellulosic chemical properties", *Biomass and Bioenergy*, 59, 208–217, (2013).