

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ, PEYNİRALTI SUYU VE
TAVUK GÜBRESİNİN KOFERMANTASYON YÖNTEMİ İLE
BİYOGAZLAŞTIRILMASI**

RAHMAN ÇALHAN

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

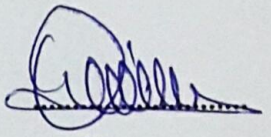
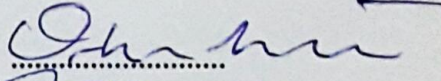
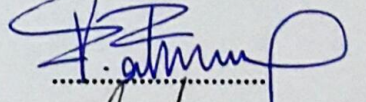
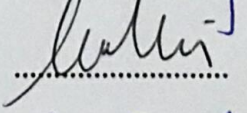
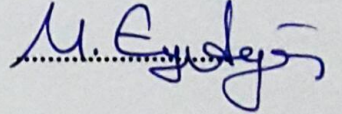
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ, PEYNİR ALTI SUYU VE
TAVUK GÜBRESİNİN KOFERMANTASYON YÖNTEMİ İLE
BİYOGAZLAŞTIRILMASI

RAHMAN ÇALHAN

Prof. Dr. Durmuş KAYA
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Orhan İNCE
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Fatma ÇANKA KILIÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Murat DOĞRU
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Muharrem EYİDOĞAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 17.11.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gün geçtikçe artan enerji talebinin karşılanabilmesi için fosil enerji kaynaklarının yanında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı giderek artmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının tükenme tehlikesi ve enerjinin pahalı bir kaynak olması nedeniyle dünya ülkeleri giderek yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya yönelmektedirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi de atıklardan biyogaz elde edilmesidir. Biyogaz üretimi üzerine yapılan çalışmalar artık birim atıktan daha fazla biyogaz üretimini sağlayamaya yönelik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden bir tanesi de atıkların birlikte anaerobik fermantasyona tabi tutulduğu kofermantasyon yöntemidir. Büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyunun kofermantasyonu ile biyogaz üretiminin gerçekleştirildiği bu çalışmamda bana her türlü destek ve olanağı sağlayan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Durmuş KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince tez izleme komitemde yer alıp olumlu yönlendirmelerini eksik etmeyen hocalarım Sayın Doç. Dr. Fatma ÇANKA KILIÇ ve Yrd. Doç. Dr. Muharrem EYİDOĞAN'a,

Doktora çalışmalarım süresince değerli düşünceleri ve tecrübelerini benimle paylaşarak katkı sağlayan değerli arkadaşım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa KARAGÖZ'e,

Doktora eğitimim boyunca sürekli olarak yardımcı olan değerli arkadaşım Süleyman SAPMAZ'a,

Bu uzun süreçte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta eşim, annem, babam, abim ve biricik oğlum Yiğit'e,

Teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Kasım - 2017

Rahman ÇALHAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	5
1.1. Anaerobik Parçalanma	5
1.1.1. Hidroliz aşaması.....	8
1.1.2. Asit üretim aşaması	8
1.1.3. Metan üretim aşaması.....	10
1.2. Biyogaz Üretimini Etkileyen İşletme Şartları	11
1.2.1. Sıcaklık	12
1.2.2. pH, alkalinite ve tamponlama kapasitesi.....	14
1.2.3. Bekletme süresi	16
1.2.4. Substrat türü	17
1.2.5. Besin maddeleri ve iz elementler	18
1.2.6. İnhibitör ve zehirleyiciler	19
1.2.7. Yükleme oranı	24
1.2.8. Karıştırma	25
1.3. Kofermantasyon	26
1.4. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	27
1.5. Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri.....	29
1.5.1. Doğrusal olmama	29
1.5.2. Öğrenebilirlik	29
1.5.3. Genelleme.....	29
1.5.4. Uyarlanabilirlik	29
1.6. YSA'nın Yapısı	30
1.7. YSA'nın Dezavantajları	31
1.8. Literatür Taraması	31
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	39
2.1. Malzeme	39
2.2. Deney Düzenegi	40
2.3. Analiz Metotları	42
2.4. Analiz Sonuçları	44
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	46
3.1.1. Kofermantasyon denemeleri	48
3.1.2. Karıştırma hızı denemeleri	53
3.1.2.1. 100 rpm karıştırma hızı denemeleri	54
3.1.2.2. 200 rpm karıştırma hızı denemeleri	57

3.1.2.3. Karıştırma hızlarının kofermantasyon ile biyogaz üretimine etkisinin karşılaştırılması.....	59
3.1.3. Sıcaklık denemeleri.....	63
3.1.3.1. 38 °C’de yapılan çalışmalar	64
3.1.3.2. 50 °C’de yapılan çalışmalar	66
3.1.3.3. Sıcaklığın kofermantasyon ile biyogaz üretime etkisinin karşılaştırılması	69
3.1.4. Yapay sinir ağı analizleri.....	73
3.1.5. Yapay sinir ağı analiz sonuçları	77
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR	85
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	92
ÖZGEÇMİŞ	93



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Anaerobik proseste gerçekleşen kritik biyokimyasal reaksiyonlar ve ürünler	6
Şekil 1.2.	Anaerobik parçalanma prosesi	7
Şekil 1.3.	Metan üreten bakterilerin çalışma sıcaklıkları	13
Şekil 1.4.	Minimum, optimum ve maksimum sıcaklığa bağlı büyüme hızları.....	13
Şekil 1.5.	Karbondiyoksit-hidrojen karbonat-karbonat tamponlama sistemi.....	16
Şekil 1.6.	Biyolojik ve yapay sınırlar a) Biyolojik sınır hücresi b) Yapay sınır hücresi	28
Şekil 1.7.	Basit bir sınır ağı diyagramı	30
Şekil 2.1.	Deney düzeneği 1	40
Şekil 2.2.	Deney düzeneği 1	41
Şekil 2.3.	Deney düzeneği 2	41
Şekil 2.4.	Deney düzeneği 2	42
Şekil 2.5.	Etüv	42
Şekil 2.6.	Kül fırını	43
Şekil 2.7.	Spektrofotometre	43
Şekil 2.8.	Gaz kromatografi cihazı	44
Şekil 3.1.	Reaktörlerden azot gazı geçirme işlemi	48
Şekil 3.2.	Reaktörlerden günlük olarak üretilen biyogaz miktarları	48
Şekil 3.3.	Reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	50
Şekil 3.4.	Reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	50
Şekil 3.5.	100 rpm karıştırma hızında günlük biyogaz üretim miktarları	54
Şekil 3.6.	100 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	55
Şekil 3.7.	100 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	55
Şekil 3.8.	200 rpm karıştırma hızında günlük biyogaz üretim miktarları	57
Şekil 3.9.	200 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	58
Şekil 3.10.	200 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları	58
Şekil 3.11.	Bütün reaktörlerin 100-200 rpm kümülatif gaz üretim miktarları	62
Şekil 3.12.	Reaktörlerin toplam üretim miktarları ve metan oranları.....	63
Şekil 3.13.	38 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları	64
Şekil 3.14.	38 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları.....	65
Şekil 3.15.	38 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları.....	65
Şekil 3.16.	50 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları	67
Şekil 3.17.	50 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları.....	68
Şekil 3.18.	50 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları.....	68
Şekil 3.19.	Bütün reaktörlerin 38-50 °C sıcaklıklardaki kümülatif gaz üretim miktarları	72
Şekil 3.20.	Reaktörlerin toplam üretim miktarları ve metan oranları.....	73

Şekil 3.21. Çalışmada kullanılan yapay sinir ağının mimarı yapısı	74
Şekil 3.22. Eğitim sonucunda elde edilen regresyon eğrileri	75
Şekil 3.23. 38 °C sıcaklık ve 200 rpm karıştırma hızında elde edilen biyogaz üretim miktarı deneysel sonuçları ile yapay sinir ağı analiz sonuçlarının karşılaştırılması	76
Şekil 3.24. Bütün reaktörlerden deneysel olarak elde edilen metan oranı sonuçları ile yapay sinir ağı analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 3.25. R3 reaktörü yapay sinir ağı sonuçları.....	78
Şekil 3.26. R4 reaktörü yapay sinir ağı sonuçları.....	79
Şekil 3.27. R5 reaktörü yapay sinir ağı sonuçları.....	80
Şekil 3.28. R6 reaktörü yapay sinir ağı sonuçları.....	81



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Fermantasyon prosesi sırasında ortaya çıkan bazı asit ve alkoller	9
Tablo 1.2.	Metan üreten bakteriler tarafından substrat olarak kullanılan bileşikler.....	10
Tablo 1.3.	Metan üreten bakteriler tarafından dolaylı yoldan substrat olarak kullanılabilen bileşikler.....	10
Tablo 1.4.	Metanojenler tarafından katalizlenen reaksiyonlar ve serbest enerjideki standart değişim	11
Tablo 1.5.	Karbonhidrat, yağ ve proteinden teorik olarak elde edilebilecek olan biyogaz ve metan miktarları.....	17
Tablo 1.6.	Bakteri hücrelerinin elementel bileşimi (Kuru ağırlık)	19
Tablo 1.7.	Seçilmiş inorganik atıklar için toksik değerler	20
Tablo 1.8.	Amonyak ve amonyum için sınır değerler.....	21
Tablo 1.9.	pH>6,8 iken sülfür bileşikleri için limit değerler	22
Tablo 1.10.	Farklı metallerin reaktör içerisindeki çözeltide inhibisyon veya toksik etki oluşturdıkları konsantrasyonları.....	22
Tablo 2.1.	Deneylerde kullanılan aşının analiz sonuçları	44
Tablo 2.2.	Büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu analiz sonuçları	45
Tablo 3.1.	1. adımda çalıştırılan reaktörler ve atık karışım oranları	46
Tablo 3.2.	Reaktör analiz sonuçları.....	47
Tablo 3.3.	Reaktörlerin başlangıç ve 15. gündeki pH değerleri.....	49
Tablo 3.4.	Reaktörlerin biyogaz ve metan verimleri.....	52
Tablo 3.5.	Reaktörlerin KOİ giderim verimleri	53
Tablo 3.6.	Reaktörlerin pH değerleri	54
Tablo 3.7.	Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği	56
Tablo 3.8.	KOİ giderim verimleri	56
Tablo 3.9.	Reaktörlerin pH değerleri	57
Tablo 3.10.	Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği	59
Tablo 3.11.	Giderilen KOİ miktarına karşılık üretilen biyogaz miktarı	59
Tablo 3.12.	Reaktörlerin pH değerleri	64
Tablo 3.13.	Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği	66
Tablo 3.14.	Reaktörlerin KOİ giderim verimleri	66
Tablo 3.15.	Reaktörlerin pH değerleri	67
Tablo 3.16.	Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği	69
Tablo 3.17.	Reaktörlerin KOİ giderim verimleri	69
Tablo 3.18.	Analizlerde kullanılan reaktör karışım oranları	77

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Br	: Yükleme oranı, (g. OKM /L.gün)
C	: Karbon
c	: Organik madde konsantrasyonu
C/N	: Karbon azot oranı
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
H	: Hidrojen
H ₂ O	: Su
H ₂ S	: Hidrojen sülfür
M	: Zamana bağlı yüklenen substrat
N	: Azot
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NH ₃	: Amonyak
NH ₄ ⁺	: Amonyum iyonu
O	: Oksijen
P	: Fosfor
S	: Kükürt
V	: Zamana bağlı beslenen substrat miktarı
V _R	: Reaktör hacmi, (m ³)

Kısaltmalar

AÇ	: Arıtma Çamuru
BBG	: Büyükbaş Hayvan Gübresi
DG	: Domuz Gübresi
HRT	: Hydraulic Retention Time (Hidrolik Bekletme Süresi)
KG	: Kanatlı Gübresi
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
PAS	: Peynir Altı Suyu
SRT	: Solid Retention Time (Katı Bekletme Süresi)
TG	: Tavuk Gübresi
TKM	: Toplam Kuru Madde
TUKM	: Toplam Uçucu Kuru Madde
UYA	: Uçucu Yağ Asitleri
UZYA	: Uzun Zincirli Yağ Asitleri
VFA	: Volatile Fatty Acid (Uçucu Yağ Asidi)
YA	: Yemek Atığı
YSA	: Yapay Sinir Ağları

BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ, PEYNİRALTI SUYU VE TAVUK GÜBRESİNİN KOFERMANTASYON YÖNTEMİ İLE BİYOGAZLAŞTIRILMASI

ÖZET

Tüketimin hızla artmasına bağlı olarak ortaya çıkan atık miktarı da aynı oranda artmaktadır. En büyük atık kaynaklarından bir tanesi de hayvansal atıklar ve hayvansal ürünlerin üretimini yapan endüstrilerdir. Bu atıkların bertaraf edilirken enerjiye dönüştürülmeleri büyük önem arz etmektedir. Tavuk gübresi ve peynir altı suyunun tek başına anaerobik fermantasyona tabi tutulması sırasında fermantasyon sürecini olumsuz yönde etkileyecek bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerin önlenmesi ve bu daha fazla biyogaz üretilebilmesi amacıyla bu üç substratın kofermantasyonu çalışılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyunun farklı karışım oranlarında, farklı karıştırma hızlarında ve farklı sıcaklık şartlarında denemeler gerçekleştirilmiş ve biyogaz üretim verimleri ve metan üretim verimleri belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Matlab programının YSA modülünde kullanılarak deneysel olarak çalışılmamış olan şartları tahmin edebilen modeller geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre en yüksek biyogaz üretimi %50 büyükbaş gübresi, %40 tavuk gübresi ve %10 peynir altı suyu oranında, en yüksek metan oranı ise %50 büyükbaş gübresi, %30 tavuk gübresi ve %20 peynir altı suyu oranında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik Kofermantasyon, Biyogaz, Büyükbaş Gübresi, Peynir Altı Suyu, Tavuk Gübresi.

BIOGAS PRODUCTION FROM CATTLE MANURE, POULTRY MANURE AND CHEESE WHEY BY CO-DIGESTION

ABSTRACT

The amount of waste due to rapidly increased consumption day by day is increasing. Animal wastes and animal production industry wastes are among the most important waste sources. It is also very important that these wastes can be used as a renewable energy source. Anaerobic fermentation of only cheese whey and only poultry manure can cause some inhibition problems. Co-digestion can be used to avoid these problems and to produce more biogas from these wastes. In this study co-digestion of cattle manure, poultry manure and cheese whey at different mixing ratios, different stirring ratios and different temperatures were studied and biogas production efficiencies and methane contents were determined. The observed results were used at Matlab ANN module and estimation models were developed. At the end of the study the highest biogas production was observed at 50% cattle manure, 40% poultry manure and 10% cheese whey mixing ratios and the highest methane content was observed at 50% cattle manure, 30% poultry manure and 20% cheese whey ratio.

Keywords: Anaerobic Co-fermentation, Biogas, Cattle Manure, Cheese Whey, Poultry Manure.

GİRİŞ

Sürekli olarak gelişen ve değişen dünyada, enerji üretimi için fosil enerji kaynaklarının kullanılmasından dolayı, kaynakların giderek tükenmesi ve fosil enerji kaynaklarının kullanılması sonucunda ortaya çıkardığı çevresel kirlilik nedeniyle yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışına gidilmektedir. Enerjinin çeşitli kaynaklardan, ucuz, temiz ve sürekli olarak temin edilebilir olması gerekmektedir [1]. Bu nedenle alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilerek kullanılması ve enerji ihtiyacının karşılanması ülke ekonomileri açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de biyogazdır. Biyogaz organik temelli artıkların oksijensiz ortamlarda fermantasyonu yolu ile oluşan renksiz, kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan ve bileşiminde organik maddelerin bileşimine bağlı olarak yaklaşık; %50-70 CH₄, %30-50 CO₂, %0-3 H₂S ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaz karışımdır. Biyogaz havadan daha hafiftir ve havaya göre yoğunluğu 0,94 kg/m³, oktan sayısı yaklaşık 110, yanma sıcaklığı 700 °C, alev sıcaklığı 870 °C ve ısıl değeri 5,96 kWh/m³ olan bir gaz karışımıdır [2]. Biyogazın yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılması son yıllarda ciddi derecede önem kazanmıştır.

Hayvancılık sektörü, ekonomik getirilerinin olmasıyla birlikte atıklarından kaynaklı bir takım çevresel sorunları ortaya çıkarabilmektedir. Hayvan yetiştiren çiftlik sayısının ve hayvansal ürün işleyen tesis sayısının artması nedeniyle hayvansal atıkların çevre üzerindeki olumsuz etkileri bazı çevresel problemlerin oluşmasına neden olmaktadır. Hayvansal atıklar nedeniyle ortaya çıkan çevresel problemler diğer atıklar kadar çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Herhangi bir işleme tabi tutulmadan arazilerde depolanan hayvansal atıkların yağmur sularıyla yıkanması sonucunda yüzeysel akışa geçen kirleticiler hem yerüstü ve yeraltı suları hem de toprağı kirletebilmektedir. Ayrıca atıkların açıkta depolanması nedeniyle ortaya çıkan kötü kokulu gazlar ve patojenik mikroorganizmalar hem çevre hem de insan sağlığını tehdit etmektedir. Hayvancılık teknolojilerindeki gelişmelerin çoğu tarımı ve çevreyi kirleten bir kaynak olarak karşımıza çıkmaktadır.

Süt endüstrisi hayvansal ürünlerin işlendiği ve üretildiği en önemli gıda sektörlerinden birisidir. Süt endüstrisinde ham süt işlenerek süt, yoğurt, peynir, tereyağı vb. gibi sütü ürünleri üretilmektedir. Bu endüstriden kaynaklanan en önemli kirlilik kaynaklarından birisi de peynir altı sularıdır. Peynir yapma tekniğine ve üretilen peynir çeşidine bağlı olmak farklılık göstermekle birlikte kullanılan sütün %70-90'ı peynir altı suyu olarak kalmaktadır [3]. Peynir altı suyu protein, yağ, vitamin ve mineraller bakımından zengin olan bir yan üründür [4]. Ortaya çıkan peynir altı suları farklı şekillerde bertaraf edilebilmektedir. Gelişmiş teknoloji kullanan tesislerde ortaya çıkan peynir altı suları farklı ürünlerin üretilmesi için tekrar kullanılabilir. Küçük çaplı üretim yapan tesislerde ise ortaya çıkan peynir altı suları ya bir alıcı ortama direk olarak gönderilmekte veya kanalizasyon sistemine gönderilerek bertaraf edilmektedir [5].

Bünyesinde önemli miktarda besleyici madde bulunduran bir atık olduğu için peynir altı suları, deşarj edildiği ortamda kötü koku oluşumu, ötrofikasyon, sinek ve haşerelerin çoğalması gibi çevre ve insan sağlığını tehdit edici unsurların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bir arıtma prosesinden geçirilmeden deşarj edilen peynir altı suları çevresel risk oluştururken, yapılan bazı çalışmalar böyle atıksuların arıtıldıktan sonra bile deşarj standartlarını sağlayamadığını göstermiştir. Süt endüstrisi atıksularının biyolojik olarak arıtımı üzerine yapılan çalışmalarda farklı arıtma yöntemleri denenmiştir. Yüksek KOİ içerikleri nedeniyle peynir altı sularının aerobik arıtım sırasında fazla oksijen gerektirmesi ve işletme masraflarını artırması nedeniyle bu atıkların aerobik arıtımı çok fazla tercih edilmemektedir. Bunun yerine havalandırma problemi olmayan ve enerjiye dönüştürülebilir bir gaz olan, metan üretimi sağlayan anaerobik prosesler tercih edilmektedir [6]. Peynir altı suları, düşük pH değerine ve kolay bozunabilir organik madde içeriğine sahip oldukları için reaktör içerisinde hızlı bir pH düşüşüne sebep olmaktadır. Bundan dolayı farklı tipte reaktörler ve işletme prosesleri geliştirilmiştir. Bunlar; tek kademeli anaerobik arıtma prosesleri, iki kademeli anaerobik arıtma prosesleri ve anaerobik-aerobik ardışık sistemlerin kullanıldığı arıtma prosesleridir [7]. Bunlara ek olarak kofermantasyon yöntemiyle peynir altı sularının farklı bir atık türüyle birlikte kullanılarak biyogaz üretimine katkı sağlanması ek bir proses ve maliyet getirmeyen kalıcı bir çözüm yöntemidir.

Hayvancılık sektörünün en önemli kollarından bir tanesi de tavukçuluk sektörüdür. Gün geçtikçe artan çiftlik sayısı nedeniyle ortaya çıkan atıkların bertaraf edilmesi büyük bir problem haline dönüşmüştür. Tavuk çiftliklerinden ortaya çıkan atıklar, tavuk gübresi, altlık malzeme (saman, buğday sapı vb.), yumurta atıkları, tüy vb. maddeleri içermektedir [8,9]. Atıkların büyük bir kısmını tavuk gübresi ve altlık malzemeler oluşturmaktadır. Tavuk gübresi içerik bakımından bakıldığında yüksek miktarda azot, fosfor ve potasyum içermektedir. Bu nedenle genellikle toprak ıslahında kullanılmaktadır. Ancak bu tür atıklar herhangi bir işlemden geçirilmeden toprağa uygulandığında bünyelerinde bulunan kirleticiler de direk olarak toprağa geçmektedir. Tek başına anaerobik arıtıma tabi tutulan bu atıklar yüksek katı madde (TKM %20-25) ve azot içeriği nedeniyle reaktör içerisinde amonyak birikimine neden olmaktadır [10]. Bu da reaktör içerisinde yaşayan mikroorganizmaların inhibe olarak yaşamsal faaliyetlerini sürdürmelerine engel olmaktadır. Bu nedenle bu atıkların anaerobik arıtımında kullanılması halinde katı madde içeriğinin düşürülmesi ve azot içeriğinin seyreltilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu atıkların kofermantasyon yöntemi ile anaerobik arıtımı uygun görülmektedir.

Hayvancılık sektöründe en fazla atık oluşturan ve çözüm bulunması gereken atıklar büyükbaş hayvan atıklarıdır. Oldukça fazla miktarda bulunan bu atıklar genellikle kurutulularak yakılmakta veya diğer atıklar gibi toprak ıslahında gübre olarak kullanılabilir. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi bu atıkların direk olarak toprağa uygulanması çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Büyük bir enerji kaynağı olan bu atıkların toprağa uygulanması ile kullanılabilir olan bir enerji kaynağı kullanılmadan atılmış olmaktadır.

Gelişmiş ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler biyogaz üzerine yatırımlar yapmakta ve birim kütleden üretilebilecek olan biyogaz miktarını artırmak için araştırma yapmaktadırlar. Üretilebilecek biyogaz miktarını artırmanın birçok farklı yolu bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi de kofermantasyon yöntemidir.

Kofermantasyon iki veya daha fazla atık çeşidinin farklı oranlarda karıştırılarak anaerobik ortamda fermentasyon işlemine tabii tutulmasıdır. Son yıllarda kofermantasyon üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde 2011 yılından itibaren kofermantasyon konusunda yapılan çalışma sayısında ciddi miktarda artış olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmaların çoğunda kullanılan substratlar ana substrat ve

yardımcı substratlar şeklinde tanımlanmıştır. Ana substrat olarak en çok kullanılan malzemeler [11];

- Hayvansal gübreler,
- Evsel arıtma çamurları,
- Evsel katı atıkların organik kısımlarıdır.

Yardımcı substrat olarak en çok kullanılan malzemeler ise;

- Hayvansal gübreler,
- Enerji bitkileri,
- Endüstriyel atıklar,
- Evsel atıklar,
- Tarımsal sanayi atıkları,
- Alglerdir.

Yukarıda belirtildiği gibi ana substrat olarak en çok kullanılan malzemeler hayvansal gübrelerdir. Hayvansal gübrelerin içerisinde ise en büyük payı inek gübresi ve domuz gübresi oluşturmaktadır. Yardımcı substrat kullanımına bakıldığında ise endüstriyel atıklar ve tarımsal sanayi atıkları en büyük paya sahiptir. Gerçekleştirilen çalışmada büyükbaş hayvan gübresi ana substrat, tavuk gübresi ve peynir altı suyu yardımcı substratlar olarak kullanılmıştır. Böylece hem bu üç atığın tek başına anaerobik fermantasyon işlemine tabi tutulması sonrasında ortaya çıkan olumsuzlukların önlenmesi hem de üretilebilecek olan biyogaz miktarının ve üretilen biyogazın metan içeriğinin artırılması amaçlanmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Anaerobik Parçalanma

Anaerobik fermantasyon prosesi organik maddelerin, biyogaza dönüştürüldüğü doğal biyolojik bir prosestir [12]. Proses, anaerobik mikroorganizmaların oksijensiz ortamda mikrobiyal aktiviteleri sonucunda gerçekleşir ve iki önemli son ürün ile neticelenir: enerji bakımından zengin biyogaz ve besi maddesi bakımından zengin gübre. Anaerobik proses doğal bir süreç olduğu için bataklıklarda, göl tabanlarında, çöp deponi sahalarında ve geviş getiren hayvanların metabolizmalarında kendiliğinden gerçekleşmektedir [13].

Anaerobik fermantasyon milattan önce 10. yüzyılda Asurlular tarafından banyo yaptıkları suyu ısıtmak için kullanılmıştır. 17. ve 18. yüzyılda ise ortaya çıkan yanıcı gazın organik maddenin azalması ile ilişkili olduğu anlaşılmış ve daha fazla organik maddeden daha fazla yanıcı gaz elde edilebileceği nicel hale getirilmiştir. 1808 yılında ise Sir Humphrey Davy sığır gübresi kullanarak elde ettiği bu yanıcı gazın aslında metandan oluştuğunu keşfetmiştir [14]. 1895 yılında İngiltere'nin Exeter şehrinde, arıtma çamurundan elde edilen biyogaz sokak lambalarında kullanılarak sokakların aydınlatılması sağlanmıştır [15]. 1930'lu yıllarda da anaerobik teknolojinin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmış olup anaerobik süreçte görev alan mikroorganizmaların tanımlanması sağlanmıştır [16]. Günümüzde anaerobik teknoloji üzerine yapılan çalışmalar giderek derinleşmektedir.

Anaerobik parçalanma prosesi, farklı mikroorganizma gruplarının baskın olduğu birkaç biyoproses sonrası, biyolojik olarak parçalanabilen katıların ve çözünebilir katıların oksijen yokluğunda biyogaza dönüştürülmesi prosesidir [17]. Baskın mikroorganizma gruplarının görev aldığı kategorilere göre anaerobik parçalanma prosesi 3 farklı aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 1.1).

Hidroliz

Kompleks karbonhidratlar \longrightarrow Basit şekerler

Kompleks yağlar \longrightarrow Yağ asitleri

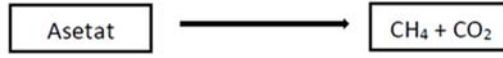
Kompleks proteinler \longrightarrow Amino asitler

Asit Üretimi

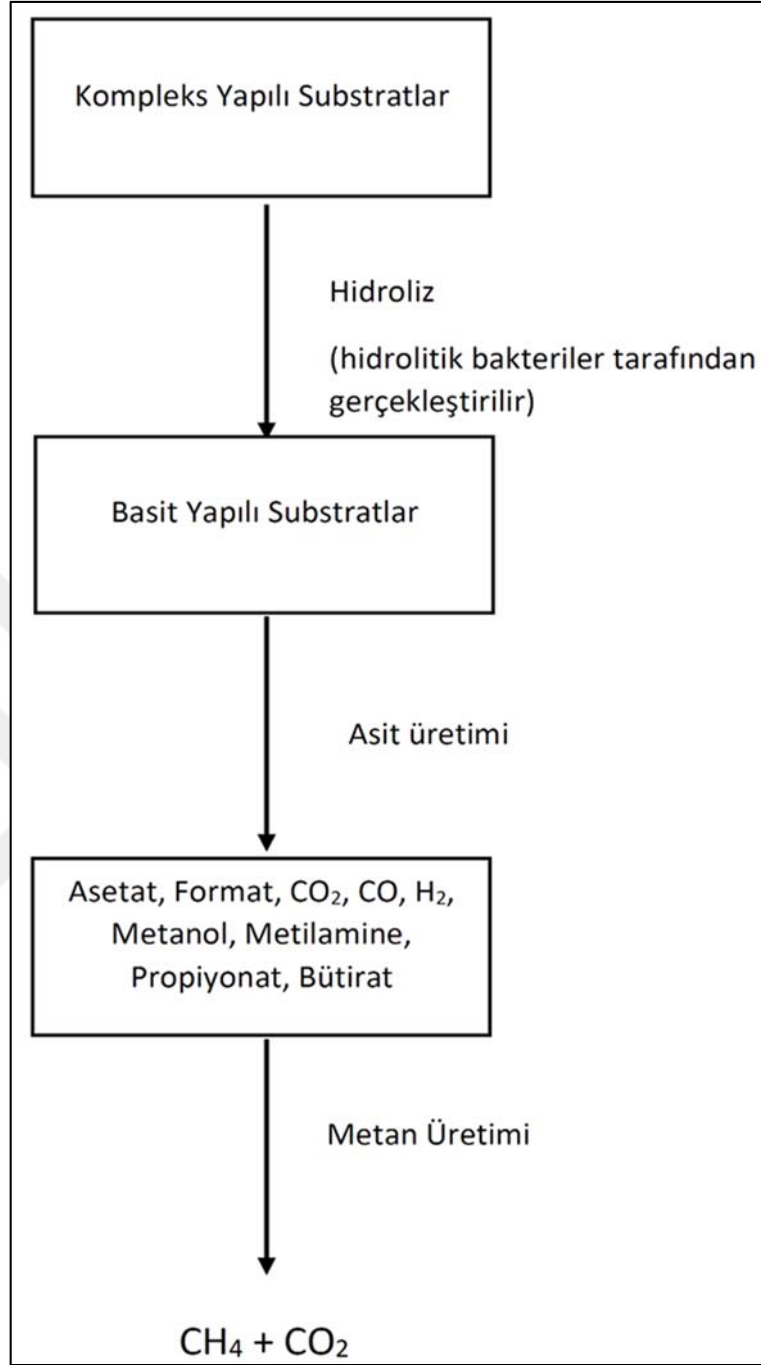
Basit şekerler + yağ asitleri + amino asitler \longrightarrow Organik asitler + alkoller

Asitleşme aşaması (asetat üretimi)

Organik asitler + alkoller \longrightarrow Asetat

Metan Üretimi: Asetoklastik Metan Üretimi**Metan Üretimi: Hidrojenotrofik Metan Üretimi****Metan Üretimi: Metilotrofik Metan Üretimi**

Şekil 1.1. Anaerobik proseste gerçekleşen kritik biyokimyasal reaksiyonlar ve ürünler [17]

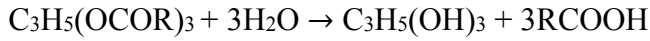
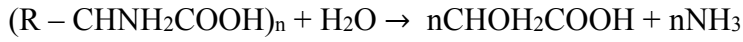
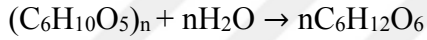


Şekil 1.2. Anaerobik parçalanma prosesi [17]

1.1.1. Hidroliz aşaması

Hidroliz kelime anlamı olarak bileşiklerin su ile parçalanması anlamına gelmektedir. Anaerobik parçalanma sırasında partiküler ve kolloidal atıklar gibi çözünemeyen bileşikler hidrolize uğramaktadırlar. Partiküler ve kolloidal atıklar karbonhidrat, yağ ve proteinlerden oluşmaktadırlar. Bu atıklar polimerik maddeler olup birbirine özel kimyasal bağlar ile bağlanmış birçok küçük molekülden oluşan çözünemeyen moleküllerdir. Küçük moleküller çözünebilir moleküllerdir ve kimyasal bağların kırılması ile çözeltilmeye karışabilmektedirler. Hidrolitik bakteriler, fakültatif anaeroblar ve anaerob bakteriler bu özel kimyasal bağları kırabilen bakterilerdir [17].

Anaerobik parçalanmanın ilk aşaması olan hidroliz safhasında protein, karbonhidrat ve yağlar gibi kompleks organik bileşikler, fermentatif bakteriler tarafından hücre dışı enzimler kullanılarak selüloz, amilaz, proteaz ve lipazlar gibi basit çözünebilir ürünlere dönüştürülürler. Bu aşamada gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [18].



1.1.2. Asit üretim aşaması

Asit üretim aşamasında, hidroliz aşamasında üretilen bileşikler fakültatif anaerobik veya anaerobik mikroorganizmalar tarafından birçok fermantasyon prosesinden geçirilerek parçalanırlar. Bu maddelerin parçalanması sonucunda ortaya karbondioksit, hidrojen gazı, alkoller, organik asitler, bazı organik azot bileşikleri ve bazı organik kükürt bileşikleri ortaya çıkar (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Fermantasyon prosesi sırasında ortaya çıkan bazı asit ve alkoller [17]

Adı	Formülü
Asetat	CH ₃ COOH
Bütanol	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH
Bütirat	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ COOH
Kaproik asit	CH ₃ (CH ₂) ₄ COOH
Format	HCOOH
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH
Laktat	CH ₃ CHOHCOOH
Metanol	CH ₃ OH
Propanol	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH
Propiyonat	CH ₃ CH ₂ COOH
Süksinat	HOOCCH ₂ CH ₂ COOH

Bu aşamada üretilen en önemli asit asetattır. Asetat, metan üreten bakteriler tarafından kullanılan temel asit türüdür. Karbondioksit ve hidrojen, direk olarak metan veya asetata dönüştürülebilmektedir. Ortamda aminoasitlerin ve proteinlerin bulunması durumunda organik azot ve organik kükürt bileşikleri ortaya çıkabilmektedir. Büyük çözünebilir organik bileşiklerin küçük çözünebilir organik bileşiklere dönüşmesi sonucunda maddelerin organik dayanımlarında bir miktar değişim gerçekleşmektedir. Organik bileşiklerin bir kısmı organik asitler ve alkollere dönüştürülürken bir kısmı ise yeni bakteri hücrelerine dönüştürülür. Organik olarak parçalanabilen bileşiklerin metan ve karbondioksit olarak giderilebildiği tek kademe metan üretim aşamasıdır.

Organik asitler, alkoller ve organik azot bileşikleri metan üreten bakteriler tarafından doğrudan veya dolaylı olarak substrat olarak kullanılabilir. Eğer ikinci aşamada metan üreten bakteriler tarafından tüketilmezse ortaya çıkan ürünler ortamda birikir ve ortamın asitleşmesine neden olmaktadır [17].

Tablo 1.2. Metan üreten bakteriler tarafından substrat olarak kullanılan bileşikler [17]

Substrat	Kimyasal Formül
Asetat	CH ₃ COOH
Format	HCOOH
Metanol	CH ₃ OH
Metilamin	CH ₃ NH ₂

Tablo 1.3. Metan üreten bakteriler tarafından dolaylı yoldan substrat olarak kullanılabilen bileşikler [17]

Substrat	Kimyasal Formül
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH
Bütirat	CH ₃ CH ₂ CH ₂ COOH
Propiyonat	CH ₃ CH ₂ COOH

Anaerobik fermantasyon sırasında asetat, asetojenik fazda da üretilebilmektedir. Asetojenik faz asit üretim aşamasında oluşmaktadır. Burada bütirat, propiyonat ve etanol gibi bazı asitler ve alkoller metan üreten bakteriler tarafından direk olarak asetata dönüştürülebilmektedir. Asetat üretimi asetojenik veya asetat üreten bakterilerin aktivitesi ile doğrudan ilişkilidir [17].

1.1.3. Metan üretim aşaması

Metanojenik aşamada asetat, karbondioksit ve hidrojen gazından metan üretimi gerçekleştirilir. Metan aynı zamanda asetat dışındaki diğer organik bileşiklerden de ortaya çıkmaktadır (Tablo1.2). Bu nedenle diğer bütün fermantasyon ürünlerinin metan üreten bakterilerin direk veya dolaylı olarak kullanabilecekleri forma dönüştürülmüş olması gerekmektedir. Asitler, alkoller ve organik azot bileşikleri metan üreten bakteriler tarafından parçalanamazlar ve reaktör süpernatantında birikirler. Bu bileşiklerin birikmesi çıkış suyunda karbondan kaynaklanan yüksek BOİ'ye neden olmaktadır [17].

Kompleks organik bileşiklerden metan elde edilme süresi, bu organik bileşiklerin metan üreten bakterilerin kullanabileceği substratlara dönüştürülme süresine bağlıdır. Organik bileşiklerin anaerobik dönüşümleri ve parçalanmaları sürecinde asetat üretimi

aşaması hızı belirleyen aşamadır. Metan üretimi gerçekleşiyorsa asetojenik aşamada herhangi bir problem olmadığı anlaşılır. Eğer metan üretiminde dengesizlik yaşıyorsa ortamda asit birikmesi olmaktadır. Biyolojik olarak çok az parçalanabilen organik maddeler için ise hız belirleyici aşama hidroliz aşamasıdır [17,19].

Tablo 1.4. Metanojenler tarafından katalizlenen reaksiyonlar ve serbest enerjideki standart değişim [17]

Reaksiyon		
Substratlar (Mol)	Ürünler (Mol)	ΔG^0 (kJ/mol CH₄)
Asetat	CH ₄ + CO ₂	-31,0
4H ₂ +CO ₂	CH ₄ + 2H ₂ O	-135,6
4HCOOH	CH ₄ + 3CO ₂ + 2H ₂ O	-130,1
4CO+2H ₂ O	CH ₄ + 3CO ₂	-211,0
4 Metanol	3CH ₄ + CO ₂ +2H ₂ O	-104,9
Metanol + H ₂	CH ₄ + H ₂ O	-112,5
2 Etanol + CO ₂	CH ₄ + 2 Asetat	-116,3
42-Propanol + CO ₂	CH ₄ + 4 Aseton + 2H ₂ O	-36,5
4 Metilamin + 2H ₂ O	3CH ₄ + CO ₂ + 4NH ₃	-75,0
2 Dimetilamin + 2H ₂ O	3CH ₄ + CO ₂ + 2NH ₃	-73,2
4 Trimetilamin + 6H ₂ O	9CH ₄ + 3CO ₂ + 4NH ₃	-74,3
2 Dimetilsülfit + 2H ₂ O	3CH ₄ + CO ₂ + 2H ₂ S	-73,8

1.2. Biyogaz Üretimini Etkileyen İşletme Şartları

Anaerobik parçalanma sırasında parçalanma hızını sınırlayan reaksiyonlar genellikle uçucu asitlerin metana dönüştürüldüğü safhada gerçekleştirilen reaksiyonlardır. Metan üreten bakteriler, uçucu asitlerin parçalanması sırasında oldukça az miktarda enerji elde etmektedirler. Uçucu asitlerden elde edilen enerjinin büyük bir kısmı metana aktarılır. Metan üreten bakterilerin kullanabileceği enerji miktarının düşük olması nedeniyle metan üreten bakterilerin çoğalma hızı oldukça yavaştır. Bu nedenle metan üretimi ve substrat parçalanmasının istenen düzeyde gerçekleşebilmesi için bu bakterilerin çalışabileceği uygun ortam şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bu şartlar uçucu asitlerin metana dönüştürülmesi sırasında hızı sınırlayan başlıca etmenlerdir. Eğer anaerobik reaktöre beslenen substratlar oldukça yavaş

parçalanabilen materyallerden oluşuyorsa hızı sınırlayan kademe hidroliz kademesi olacaktır [17].

Bütün mikroorganizma grupları için gerekli olan çevresel şartlar ancak iki kademeli anaerobik proses ile sağlanabilmektedir. İki kademeli anaerobik proseste birinci kademede hidroliz ve asitleşme ikinci kademede ise metan üretimi gerçekleşmektedir. Tek kademeli anaerobik proseste bütün reaksiyonlar aynı reaksiyon sisteminde gerçekleştiği için öncelikli olarak metan bakterilerinin ortam şartlarının sağlanması gerekmektedir [19].

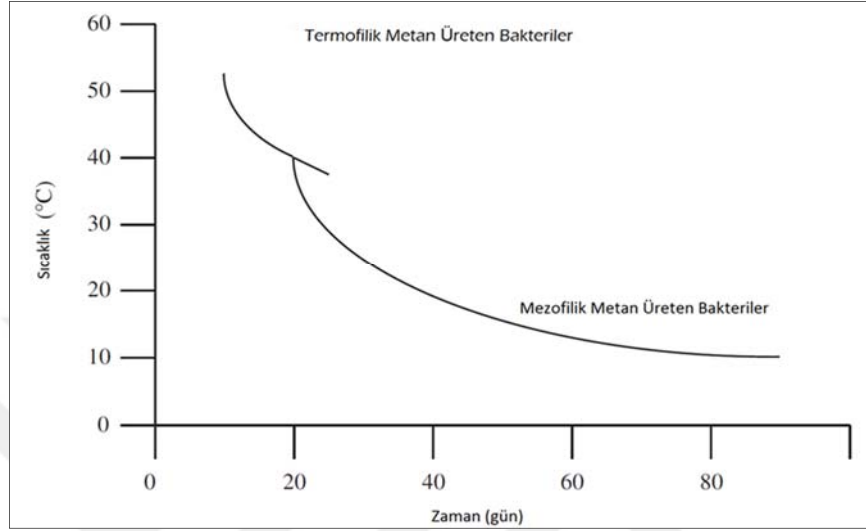
Metan üreten bakteriler zorunlu anaerobik bakterilerdir ve alkalinite, pH ve sıcaklık değişimlerinden oldukça etkilenmektedirler. Herhangi bir sıcaklık değişimi, substratın veya substrat konsantrasyonunun değişmesi gaz üretiminin durmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle reaktörün işletme şartları periyodik olarak gözlenmelidir. Alkalinite, pH ve sıcaklığa ek olarak metan üreten bakterilerden optimum verimi sağlayabilmek için üretilen gazın içeriği, hidrolik bekletme süresi, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli ve uçucu asit konsantrasyonu da sürekli olarak izlenmeli ve kontrol edilmelidir [17,19].

1.2.1. Sıcaklık

Sıcaklık, bakteriyel büyüme üzerine etki eden en önemli faktörlerden bir tanesidir [20]. Sıcaklık mikroorganizmaları iki şekilde etkiler. Sıcaklığın artmasıyla birlikte hücre içerisindeki kimyasal ve enzimatik reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşir ve mikrobiyal büyüme de daha hızlı gerçekleşir. Ancak belirli bir sıcaklığın üzerine çıktığında hücre bileşenleri geri dönüşü mümkün olmayan bir şekilde hasar görebilir [21]. Bakteriyel aktivitenin tam olarak gerçekleşebilmesi için reaktörün bütün bölgelerinde uniform bir sıcaklığın sağlanabilmesi gerekmektedir. Reaktör içerisindeki birkaç derecelik sıcaklık değişimleri bile metan üreten bakteriler başta olmak üzere bazı anaerobik bakterilerin biyolojik aktivitelerini olumsuz yönde etkilemektedir [17].

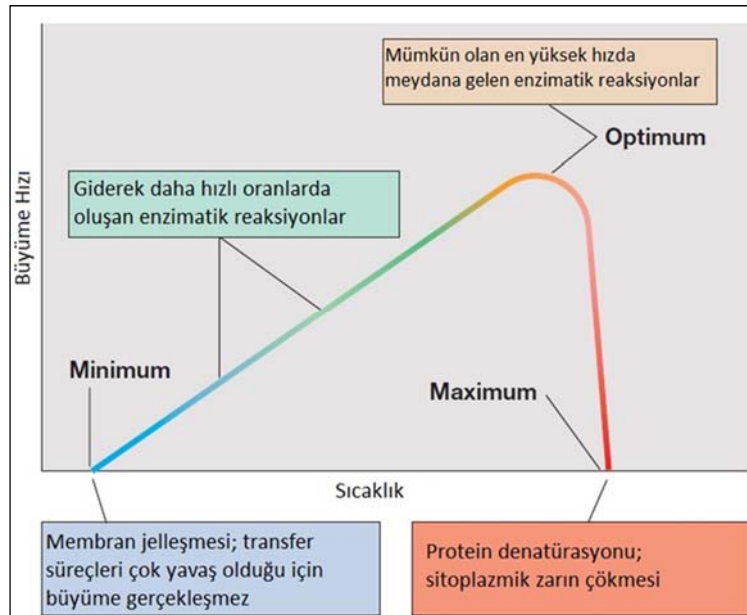
Anaerobik parçalanma prosesi üç farklı sıcaklık aralığında gerçekleşebilmektedir: psikrofilik (25 °C'den düşük), mezofilik (25 °C- 45 °C) ve termofilik (45 °C-70 °C) [22]. Anaerobik ortamda substratı kullanan mikroorganizma grubu hangisi olursa olsun sıcaklıktan oldukça fazla etkilenmektedir. Bu etkilenme metanojen bakterilerde

hidrolitik veya asidojenik bakterilere göre daha fazla gerçekleşmektedir [23]. Metan üreten mikroorganizma türleri oldukça geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmektedirler ancak birçok metan üreten mikroorganizma türü mezofilik şartlarda yaşayabilmektedir [21].



Şekil 1.3. Metan üreten bakterilerin çalışma sıcaklıkları [21]

Kullanılan substrata bağlı olarak metan üretim hızına bakıldığında termofilik sistemlerin mezofilik sistemlere göre yaklaşık olarak %25-50 daha fazla metan üretim hızına sahip olduğu görülmektedir [23].



Şekil 1.4. Minimum, optimum ve maksimum sıcaklığa bağlı büyüme hızları [22]

Reaksiyonların (standart koşullar altında) termodinamiğine bakıldığında endergonik reaksiyonların (örneğin propiyonatin asetat, CO₂ ve H₂'ye parçalanması) gerçekleşmesi sırasında yüksek sıcaklıkların ekzergonik reaksiyonlara göre (örneğin hydrogenotrophic metanogenez) daha etkili olduğu görülmüştür. Termofilik sıcaklıklarda çalışmanın bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [23];

Avantajları:

- Etkili patojen giderimi sağlanır,
- Yüksek sıcaklıklarda metanojen bakterilerin büyüme hızı da artar,
- Bekletme süresi düşer ve daha hızlı ve verimli bir proses sağlanır,
- Daha iyi substrat kullanımı ve substratların daha kolay parçalanması sağlanır,
- Katı ve sıvı fazların daha iyi ayrılması sağlanır.

Dezavantajları:

- Proses stabilitesi düşüktür,
- Yüksek sıcaklık gereksinimi nedeniyle enerji ihtiyacı yüksektir,
- Amonyak birikimi nedeniyle inhibisyon riski yüksektir.

1.2.2. pH, alkalinite ve tamponlama kapasitesi

pH değeri, bir çözeltinin asidite/alkalinite derecesinin ölçülmesinde kullanılan ve çözeltinin hidrojen iyonu konsantrasyonunu gösteren bir değerdir [19,23]. Anaerobik proste pH değeri tıpkı sıcaklıkta olduğu gibi sürekli olarak takip edilmesi gereken bir parametredir. Reaktör içerisinde pH derecesi hem reaktör içerisi durumunun hem de prosteeki dengesizliklerin bir göstergesi olarak kullanılabilir [24,25]. Anaerobik proste asit üreten bakterilerin enzimatik aktiviteleri pH 5,0 üzerinde gerçekleşirken metan üreten bakterilerin enzimatik aktiviteleri pH 6,2'nin altında gerçekleşmemektedir. Anaerobik proste, metan bakterilerini de kapsayan birçok anaerobik bakteri, pH 6,8-7,2 aralığında iyi bir şekilde çalışabilmektedir [17].

Anaerobik bir reaktör içerisinde, uçucu yağ asitlerinin üretilmeye başlanmasıyla pH düşmeye başlar. Metan üreten bakteriler ise uçucu yağ asitlerini tüketerek alkalinite üretilmesine ve pH değerinin yükselmesine neden olurlar. Böylece reaktör içerisinde pH dengelenmesi gerçekleşmiş olur.

Alkalinite, uçucu yağ asiti birikiminin kontrolünde pH yerine kullanılabilen ve daha etkili olan alternatif bir yöntemdir [24]. Anaerobik bir reaktör içerisinde alkalinite, organik azot bileşiklerinin parçalanması sonucu ortaya çıkan amino asit ve proteinler ile organik asitlerin parçalanması sonucu ortaya çıkan karbondioksitten kaynaklanmaktadır. Aminoasitler ve proteinler parçalandığında amino grupları ortaya çıkar ve alkalinite üretilmiş olur. Amino grupları ise amonyağın ortaya çıkmasına neden olur. Amonyak su içerisinde çözünür ve karbondioksitle birleşerek amonyum bikarbonat ortaya çıkar.

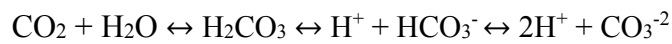


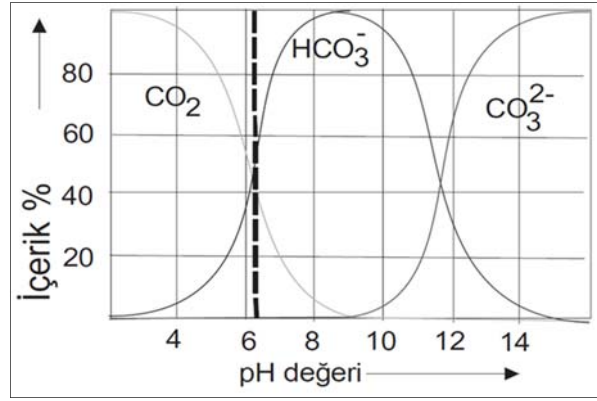
Alkalinitenin normal çalışma şartlarının altına düşmesi reaktör içerisinde bir problem olduğunu göstermektedir. Alkalinitenin yükselmesinin sebebi;

1. Metan üreten bakterilerin, organik asitleri metana dönüştürememesi sonucu organik asit birikmesi,
2. Anaerobik reaktör içerisine ani organik asit yüklenmesi,
3. Ortamda metan üreten bakterilerin aktivitesini sınırlandıracak atıkların bulunması olabilmektedir [17].

Aslında anaerobik bir sistemde fermantasyon süresince pH değeri doğal olarak nötr aralığında tutulur. Bu durum karbondioksit-hidrojen karbonat-karbonat tamponlama sistemi ve amonyak-amonyum tamponlama sistemi olmak üzere iki farklı şekilde sağlanmaktadır.

Birçok güçlü asidifikasyon, karbondioksit-hidrojen karbonat-karbonat tamponlama sistemi ile önlenmektedir. Fermantasyon boyunca sürekli olarak CO₂ ortaya çıkar ve havaya karışır. pH değerinin düşmesi ile çözülmüş CO₂ iyonize karbonik aside dönüşür. Bu nedenle hidrojen iyonu serbest kalır.





Şekil 1.5. Karbondioksit-hidrojen karbonat-karbonat tamponlama sistemi [17]

1.2.3. Bekletme süresi

Anaerobik parçalanmanın gerçekleştiği bir reaktör için katı bekletme süresi (SRT) ve hidrolik bekletme süresi (HRT) olmak üzere iki farklı bekletme süresi bulunmaktadır. SRT, anaerobik reaktör içerisinde bulunan bakterilerin reaktör içerisinde bulunma süresini ifade ederken, HRT substratın reaktör içerisinde bulunma süresini ifade etmektedir. Geri dönüşümsüz, askıda büyüyen bir reaktör için SRT ve HRT aynıdır ancak eğer sistemde katıların geri dönüşümü gerçekleştiriliyorsa SRT ve HRT farklılık gösterebilir.

Anaerobik parçalanmada yüksek SRT değerleri genellikle avantaj sağlamaktadır. Yüksek SRT değerleri substrat tüketim kapasitesinin artmasını ve reaktör hacminin düşmesini sağlamaktadır. Ayrıca yüksek SRT değerleri reaktör içerisinde tamponlama kapasitesinin artmasını sağlarken, aşırı yüklemelere ve toksik bileşiklere karşı reaktörün korunmasını sağlar [18].

HRT, reaktör hacmi ve reaktöre yüklenecek olan substrat miktarıyla ilgilidir. HRT'nin yüksek olması, organik maddelerin parçalanması için gerekli olan süresinin geçmesini sağlamaktadır. Aşağıdaki denkleme göre organik yükleme oranının artması HRT'nin düşmesine neden olmaktadır. Düşük HRT ise iyi bir substrat akış hızı sağlarken gaz veriminin düşmesine neden olmaktadır [13,26,27].

$$\text{HRT} = V_R / V \quad (1.1)$$

HRT: Hidrolik bekletme süresi

V_R : Reaktör hacmi (gün)

V : Zamana bağlı olarak beslenen substratın hacmi (m^3/g)

Her substratın parçalanma hızının farklılık göstermesi nedeniyle kullanılacak olan her bir substrat ve uygulanacak anaerobik teknoloji için HRT de farklılık gösterir. Bu nedenle HRT'nin substrata adapte edilmesi gerekmektedir.

1.2.4. Substrat türü

Anaerobik bakteriler birçok farklı bileşiği parçalayabilmektedirler. Bu nedenle genel olarak karbonhidrat, protein ve yağ içeren, lignin dışındaki neredeyse tüm organik kökenli malzemeler biyogaz üretmek için kullanılabilir [17,28]. Kullanılan substratın tipi ve bileşimi biyogaz verimini doğrudan etkilemektedir [24]. Farklı türdeki substratlardan elde edilebilecek biyogaz miktarı da farklı olmaktadır. bu durum farklı substratların karbonhidrat, yağ ve protein içeriklerindeki (Tablo 1.5) farklılıktan kaynaklanmaktadır [13,29].

Tablo 1.5. Karbonhidrat, yağ ve proteinden teorik olarak elde edilebilecek olan biyogaz ve metan miktarları [13]

Substrat	Biyogaz (m^3/t)	Metan (m^3/t)	Metan İçeriği (%)
Karbonhidratlar	830	415	50
Yağlar	1444	1014	70,2
Proteinler	793	504	63,6

Anaerobik parçalanma sonucu biyogaz üretiminde kullanılan substrat türlerini üç ana grupta toplamak mümkündür [14];

- Tarımsal kaynaklı substratlar (hayvan gübresi, tarımsal atıklar, ölü hayvan atıkları, enerji bitkileri)
- Endüstriyel kaynaklı substratlar (atıksular, çamurlar, yan ürünler, kesimhane atıkları, biyokatılar)
- Evsel kaynaklı substratlar (evsel arıtma çamuru, evsel katı atıkların organik kısımları)

Kullanılacak olan substrat seçilirken [17] ;

- Substratın organik içeriğinin seçilen fermantasyon prosesine uygun olmasına,
- Substratın besin değerlerinin ve dolayısıyla gaz üretim potansiyelinin yüksek olmasına,
- Substratın patojen ve diğer zararlı mikroorganizmaları içermemesine,
- Substratın fermantasyon sürecinin aksamasına neden olabilecek zararlı maddeleri içermemesine,
- Fermantasyon sonrası üretilen biyogaz içeriğinin, biyogazın kullanılacağı ekipmana uygun olmasına,
- Fermantasyon sonrası ortaya çıkan atık ürünlerin içeriğinin, gübre vb. kullanım için uygun olmasına dikkat edilmelidir.

Kullanılacak olan substrat içeriğine bağlı olarak, fermantasyon sürecinde ortaya çıkan ara ürünler, fermantasyon sürecini inhibe edebilir veya sınırlandırabilir. Örneğin yağların parçalanması sonucunda ortaya çıkan yağ asitleri birikerek parçalanmanın durmasına sebep olabilirler.

1.2.5. Besin maddeleri ve iz elementler

Anaerobik fermantasyon prosesi mikroorganizmaların büyümesine dayalı bir süreçtir. Bu nedenle mikroorganizmaların büyümesi ve verilen substratı kullanarak verimli bir şekilde biyogaz elde edilebilmesi için, gerekli olan optimum besin maddesi ihtiyacının karşılanması gerekmektedir [30].

Bir hücre yapısında karbon, oksijen, hidrojen, azot, fosfor, sülfür, potasyum, kalsiyum, magnezyum ve demir gibi makro elementler ve mangan, molibden, çinko, bakır, kobalt, nikel, vanadyum, bor, klor, sodyum, selenyum, silikon ve tungsten gibi mikro elementler bulunmaktadır (Tablo 1.6). Hücrenin büyümesinde temel faktörler amino asitler, pürin/primidin ve vitaminlerdir [17]. Bir organik substratın içeriğinde bulunan karbonhidratlar ve yağlar gerekli olan karbon, oksijen ve hidrojenin temin edilmesini sağlarken proteinler, azot ve sülfür gereksinimini karşılamaktadır. Bütün bu elementlerin yanında birçok organik substrat potasyum, sodyum, magnezyum, kalsiyum ve demir ile birlikte diğer iz element gereksiniminin karşılanmasına yardımcı olmaktadır [30].

Tablo 1.6. Bakteri hücresinin elementel bileşimi (Kuru ağırlık)
[18]

Element	Yaklaşık kompozisyon (%)
Karbon	50
Oksijen	20
Azot	12
Hidrojen	8
Fosfor	2
Sülfür	1
Potasyum	1
Diğer	6

Kararlı bir anaerobik proses işletmesi için makronütrient ile mikronütrient ihtiyacının dengeli bir şekilde karşılanması gerekmektedir [31]. Anaerobik proseste mikroorganizma büyüme hızı oldukça yavaş olduğundan besin maddesi ihtiyacı da düşüktür. Dengeli bir metan üretimi ve kararlı bir anaerobik proses için C:N oranının 16:1-25:1 aralığında olması gerekmektedir. Bu oran kullanılacak olan substrat türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Gerekli olan besin maddesi oranları ise C:N:P:S=500-1000:15-20:5:3 ve organik madde ihtiyacı KOİ:N:P:S=800:5:1:0,5 şeklindedir [17].

C:N oranı çok düşük olan substratların kullanılması durumunda amonyak üretimi artar ve metan üretimi inhibisyona uğrar. C:N oranı çok yüksek olan substratların kullanılması durumunda ise azot eksikliği nedeniyle, protein oluşumu negatif yönde etkilenir ve mikroorganizmaların büyüme ve çoğalma hızı yavaşlar [17]. Anaerobik proseste besin maddesi dengesinin sağlanabilmesi için çoğunlukla kofermantasyon yöntemi kullanılır. Kofermantasyon yönteminde farklı türden atıklar birlikte kullanılarak anaerobik fermantasyon işlemi gerçekleştirilir. Böylece tek tür substrat kullanımından dolayı ortaya çıkabilecek problemlerin önüne geçilmiş olur [30].

1.2.6. İnhibitör ve zehirleyiciler

Birçok bileşik mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetlerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [32]. İnhibitör bileşikler, bazen kullanılan substratın içeriğinde bulunabildiği gibi bazen de anaerobik parçalanma sırasında yan ürün olarak da ortaya çıkabilmektedirler. Uçucu yağ asitleri, bazı uzun zincirli yağ asitleri, amonyak ve sülfür bileşikleri genellikle anaerobik parçalanma sırasında ortaya çıkarken bazı uzun

zincirli yağ asitleri, ağır metaller ve antibiyotikler (Tablo 1.7) gibi bazı bileşikler de kullanılan substratın içeriğinde bulunabilmektedirler [24,32].

Tablo 1.7. Seçilmiş inorganik atıklar için toksik değerler [18]

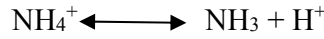
Atık	Reaktöre giren konsantrasyon (mg/L)
Amonyak	1500
Arsenik	1,6
Bor	2
Kadmiyum	0,02
Krom (Cr ⁺⁶)	5-50
Krom (Cr ⁺³)	50-500
Bakır	1-10
Siyanür	4
Demir	5
Magnezyum	1000
Sodyum	3500
Sülfür	50
Çinko	5-20

Uçucu yağ asitleri (UYA): UYA, anaerobik parçalanmanın en temel ara ürünüdür ve kullanılmadığında birikerek inhibisyon etkisi yaratmaktadır. Düşük pH değerlerinde UYA, ayrışmayan kısımlarının artması nedeniyle daha da toksik hale gelmektedir. UYA'nın ayrışmayan kısımları hücre zarını direk olarak geçer. Hücre içerisinde ayrışarak ortam pH'ını düşürür ve hücre içi dengesi bozulur [24]. pH ve alkalinite gibi diğer bazı parametreler ile birlikte UYA konsantrasyonlarının belirlenmesi, fazla organik madde yüklemesinin neden olduğu ve yavaş gelişen problemlerin önceden belirlenmesini sağlayabilir [33].

Amonyak: Azot bileşiklerinin anaerobik parçalanması sonrasında amonyak ve amonyum ortaya çıkmaktadır. Bakteriyel büyümenin gerçekleşebilmesi için azot önemli bir maddedir ve amonyak önemli bir azot kaynağıdır. Amonyak, substratta bulunan amonyum iyonlarından ortam pH'ına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bir sulu çözeltide amonyak, amonyum ile sürekli denge halindedir. Bu denge hali ise ortamın asidite, pH ve sıcaklığına bağlı olarak değişir. Amonyumun mikroorganizmalar üzerine negatif etkisi amonyağa göre daha düşüktür. Amonyak mikroorganizmalara inhibisyon etkisi yaratmakta ve daha yüksek konsantrasyonları toksik olabilmektedir [17,28]. Amonyak ve amonyum için sınır değerler Tablo 1.8'de verilmiştir.

Tablo 1.8. Amonyak ve amonyum için sınır değerler [17]

Madde	Etkileşim	İnhibisyon başlama konsantrasyonu (mg/L)	Toksisite (mg/L adapte olan mikroorganizma)
Amonyum	Ca ⁺² , Na ⁺	1500-10000	30000
Amonyak	-	80	150



Yüksek pH değerlerinde yukarıdaki denklik sağa doğru kayar ve ortam mikroorganizmalar için toksik hale gelir. Yüksek sıcaklık değerleri de yukarıdaki denkliğin sağa doğru kaymasına neden olur. Termofilik biyogaz proseslerinin mezofilik biyogaz proseslerine göre amonyak inhibisyonuna daha hassas olmalarının sebebi budur [28].

Sülfür bileşikleri: Anaerobik ortamda yüksek konsantrasyonlarda sülfür bileşikleri ve çözülmüş H₂S gazı bulunması toksisiteye neden olmaktadır. Oksijensiz ortamda sülfat bulunması, ortamda anoksik koşulların oluşmasına neden olmaktadır. Mikroorganizmalar oksijen yokluğunda sülfatı elektron alıcısı olarak kullanabilirler. Sülfat indirgeyen mikroorganizmalar, anaerobik sistemlerde bazı substratları (asetat, hidrojen, propiyonat, bütirat) kullanabilmektedirler. Bu durum sülfat indirgeyen mikroorganizmaların aynı substratı kullanan mikroorganizmalarla substrat kullanmak için yarışa girmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak elektron akışı metan üretimi yerine sülfite doğru kayar ve anaerobik sistemden biyogaz üretim verimi düşer [14].

Anaerobik ortamda, sülfatın indirgenmesi ve amino asit, protein gibi sülfür içeren organik bileşiklerin parçalanması sonrasında hidrojen sülfür (H₂S) ortaya çıkmaktadır [18]. Sülfür, anaerobik bakterilerin metabolik aktivitesini inhibe ettiği için çözünebilir hidrojen sülfür toksik etki yaratmaktadır. Aslında sülfür inhibisyon mekanizması tam olarak bilinmemektedir ancak nötr pH'da, 200 mg/L gibi düşük konsantrasyonlarda bile inhibisyon görülebilmektedir [34].

Tablo 1.9. pH>6,8 iken sülfür bileşikleri için limit değerler [17]

Madde	Minimum iz element miktarı (mg/L)	İnhibisyon başlama konsantrasyonu (mg/L)	Toksisite (mg/L adapte olan mikroorganizma)
Sülfür bileşikleri	CSB:S oranı	H ₂ S: 50	1000
	800:0,5	S ⁻² : 100	600
		Na ₂ S: 150	

Uzun zincirli yağ asitleri (UZYA): UZYA hidrolize olmuş bitkisel yağlarda yüksek konsantrasyonda bulunabilirken, yağ ve lipidlerin parçalanması sonrasında da ortaya çıkabilmektedir. UZYA bakteri hücrelerinin çeperine yapışarak adsorblanır ve hücre içerisine besin giriş-çıkışını engeller. Böylece hücre yaşamsal faaliyetlerini devam ettiremez hale gelir [24].

Ağır metaller: Mikroorganizmalar gelişip çoğalabilmek için, iz elementler denilen ağır metallere çok düşük konsantrasyonlarda ihtiyaç duymaktadırlar. İz elementlerin yüksek konsantrasyonda bulunmaları, mikroorganizmalar için toksik etki yaratmaktadır (Tablo 1.10) [17]. Ağır metaller iyonik formda bulduklarında mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir. Mikroorganizma tarafından kullanılan ağır metaller hücre zarının iyon değiştirme bölgesine bağlanırlar ve hücre dışı enzimler ile birlikte bir matris oluştururlar [24].

Tablo 1.10. Farklı metallerin reaktör içerisindeki çözeltide inhibisyon veya toksik etki oluşturdukları konsantrasyonları [17]

Madde	İz element olarak gerekli olan minimum miktar (mg/L)	Etkilenen parametreler	İnhibisyon başlama konsantrasyonu (mg/L)		Toksisite (mg/L adapte olan mikroorganizma)
			Serbest iyon	Karbonat olarak	
Cr	0,005-50	-	28-300	530	500
Fe	1-10	CO ₂ 'nin CH ₄ 'e anaerobik dönüşümü sırasında gereklidir Hidrojenazlarda bulunur İnorganik maddeleri indirger Hücre enzimlerinde bulunur Taşıma ve depolama proteinlerinde bulunur	Belirtilmemiş	1750	Belirtilmemiş

Tablo 1.10. (Devam) Farklı metallerin reaktör içerisindeki çözeltide inhibisyon veya toksik etki oluşturdukları konsantrasyonları [17]

Ni	0,005-0,5	CO ₂ 'nin CH ₄ 'e anaerobik dönüşümü sırasında gereklidir Hidrojenazlarda bulunur Hücre enzimlerinde bulunur	10-300	-	30-1000
Cu	Asetojenik mikroorganizmalar için ek olarak gerekmektedir	Hücre enzimlerinde bulunur Taşıma ve depolama proteinlerinde bulunur	40-300	170	170-300
Mg		Yapısal proteinlerde bulunur	-	-	-
Zn	Asetojenik mikroorganizmalar için ek olarak gerekmektedir	Yapısal proteinlerde bulunur Hücre enzimlerinde bulunur Taşıma ve depolama proteinlerinde bulunur	400	160	250-600
Cd	Belirtilmemiş	-	70-600	180	20-600
Pb	0,02-200	-	8-340	Belirtilmemiş	340
Co	0,003-0,05	CO ₂ 'nin CH ₄ 'e anaerobik dönüşümü sırasında gereklidir Hücre enzimlerinde bulunur	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
Se	-	-	-	-	-
Mo	0,005-0,05	CO ₂ 'nin CH ₄ 'e anaerobik dönüşümü sırasında gereklidir Hücre enzimlerinde bulunur	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
Mn	0,005-50	Hücre enzimlerinde bulunur	1500	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş
W	-	Hücre enzimlerinde bulunur	-	-	-
Ca	-	Yapısal proteinlerde bulunur	-	-	-
V	-	Hücre enzimlerinde bulunur	-	-	-
Na	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-

Oksijen: Mikroorganizmalar oksijenle ilişkilerine göre aerobik (oksijen varlığında çoğalabilen), fakültatif anaerob (oksijen varlığında da yokluğunda çoğalabilen ama gereksinim duymayan) ve anaerobik (oksijen varlığında çoğalamayan) olarak sınıflandırılabilirler [35]. Anaerobik proste asitleştirme safhasında bulunan mikroorganizmaların çoğunluğu fakültatif anaerobtur. Ancak metanojenik mikroorganizmalar zorunlu anaerobik mikroorganizmalardır ve oksijen yerine nitrat, sülfat veya karbonatı son elektron alıcısı olarak kullanırlar. Oksijen varlığında, 0,1 mg/L O₂ konsantrasyonlarında inhibisyon etkisi görülmeye başlanır [17].

Normal işletme şartları altında fakültatif anaerobik mikroorganizmaların ortamda bulunması halinde, ortamda oksijen varsa fakültatif mikroorganizmalar hızlı bir şekilde oksijeni tükettiğinden, metanojenik mikroorganizmalar ortamda çoğalabilmektedir. Ancak biyogaz üretimi için kullanılan reaktörlerde anaerobik şartların sağlanması gerekmektedir. Biyoteknolojik olarak biyogazın desülfürizasyonu işlemi için reaktör içerisine az miktarda gönderilen havanın metan üretimi üzerine olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır [17].

1.2.7. Yükleme oranı

Bir biyogaz tesisinin yapımı ve işletmesi aslında ekonomik ve teknik şartların birlikte sağlanabilmesine bağlıdır. Bir atığın tamamen çürütülerek maksimum biyogaz üretiminin sağlanabilmesi için atığın reaktörde uzun süre bekletilmesi ve daha büyük hacimli reaktörlerin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle uygulamada bir biyogaz tesisi inşa edilirken, dizayn (boyutlar ve tip) veya bekletme süresi en ekonomik ve yüksek biyogaz üretimi gerçekleştirilecek şekilde seçilir. Bu nedenle organik yükleme oranı en önemli işletme parametrelerinden bir tanesidir [27]. Organik yükleme oranı temel olarak, bir anaerobik sistemin biyolojik dönüşüm kapasitesinin bir göstergesidir [26]. Organik yükleme oranı, sıcaklık, kullanılan substratın katı madde içeriği ve bekletme süresi ile birlikte değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Ekonomik açıdan bakıldığında organik yükleme oranının olabildiğince yüksek olması gerekmektedir ancak üretilecek biyogaz verimine bakıldığında ise verimi etkilemeyecek kadar düşük olmalıdır [17]. Anaerobik sistemin kapasitesinin üzerinde organik yükleme oranı ile beslenmesi, ortamda uçucu asitlerin birikmesine neden olur

ve inhibisyon etkisi nedeniyle biyogaz veriminin düşmesine neden olmaktadır [26]. Genellikle anaerobik reaktörlerde 1-3 kg_{KM}/m³.gün arasında yükleme oranı kullanılırken yapılan bazı çalışmalarda 6 kg_{KM}/m³.gün organik yükleme oranında çalışıldığı belirtilmiştir [17]. Organik yükleme oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir [27]:

$$B_R = m.c / VR \quad (1.2)$$

B_R : organik yük [kg/d.m³]

m : zamana bağlı yüklenen substrat [kg/d]

c : organik madde konsantrasyonu [%]

1.2.8. Karıştırma

Anaerobik bir prosesten yüksek miktarda biyogaz elde edebilmek için substrat ile mikroorganizmanın buluşturulması gerekmektedir. Bu işlem genellikle reaktör içerisinde karıştırılması ile sağlanmaktadır [31]. Karıştırma, mikroorganizma ile substratın temasını sağlarken aynı zamanda sıcaklığın reaktör içerisinde üniform olarak dağılmasını sağlamaktadır. Ayrıca reaktörün karıştırılması ile reaktörün tabanında çamur birikmesi önlenirken reaktörün üst kısmında oluşabilecek tabakalaşmanın da önüne geçilmiş olur [34].

Asetat üreten bakteriler ile metan üreten bakterilerin metabolik aktivitesi gereği yakın temasta bulunmaları gerekmektedir. Bu yakın temas yavaş bir karıştırma ile gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca karıştırma, atıkların etkin bir hidrolize uğramasını ve asit üreten bakteriler tarafından organik asit ve alkol üretilmesini sağlamaktadır. Anaerobik proseste karıştırmanın avantajları şunlardır [18]:

- Pislik birikimini azaltma veya ortadan kaldırma,
- Termal tabakalaşmayı veya lokal depresif sıcaklık ceplerinin oluşumunu önleme,
- Reaktör içerisinde fiziksel ve kimyasal bütünlüğünün sağlanması,
- Substrat parçalanması sırasında ortaya çıkan metabolik atıkların (ürünlerin) reaktör içerisinde hızlı bir şekilde dağılması,
- Reaktöre toksik atık girdiğine reaktör içerisinde hızlı bir şekilde dağılarak seyrelmesi (toksisitenin azaltılması),
- Çamur çökmesinin engellenmesi.

Yukarıda bahsedildiği gibi anaerobik proseste reaktör içerisinde karıştırılması biyogaz üretiminin artırılması için yapılması gereken bir işlemdir. Ancak aşırı karıştırma mikroorganizma kümelerinin dağılmasına neden olduğu için biyogaz üretimini düşürebilmektedir [30].

1.3. Kofermantasyon

Anaerobik parçalanma prosesinde bazı atıkların tek başına anaerobik fermantasyona tabi tutulması sırasında birtakım problemler ortaya çıkabilmektedir. Örneğin;

- Arıtma çamurları düşük organik yükleme oranına sahip atıklardır,
- Hayvansal gübreler düşük organik yükleme oranına sahip olmakla birlikte yüksek azot içeriğine sahiptir ve bu durum metanojenlerin inhibisyona uğramasına sebep olabilmektedir,
- Evsel katı atıkların organik kısımları ağır metaller gibi anaerobik parçalanmaya uygun olmayan atıkları içerebilmektedir,
- Tarım atıkları ve tarım endüstrisi atıkları mevsimsel olarak ortaya çıkmakta ve bu atıklar azot bakımından fakirdirler,
- Mezbaha atıkları ise metanojenik mikroorganizmaların aktivitesini inhibe edebilecek kadar yüksek miktarda azot ve uzun zincirli yağ asidi içermektedir.

Yukarı bahsedilen anaerobik proseste meydana gelebilecek olan bütün problemler, bu atıklar ile birlikte farklı türde atıkların kullanılması ile çözülebilmektedir [36]. İki veya daha fazla atığın birlikte homojen bir şekilde anaerobik fermantasyona tabi tutulması işlemine kofermantasyon denilmektedir. Kofermantasyonun en yaygın kullanım şekli, temel olarak büyük miktarda bir ana substratın (örneğin gübre veya arıtma çamuru) ve yanında daha az miktarlara yardımcı bir substratın birlikte kullanılmasıdır [37]. Anaerobik kofermantasyon uygulanırken kullanılacak olan substratların, makro-mikro besin maddesi dengeleri, nem içerikleri ve inhibitör veya toksik bileşikler gibi birbirlerini pozitif olarak etkileyebilecekleri özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Gerekli koşullar sağlandığında kofermantasyon ile her iki substratın tek başına fermantasyonu sonucunda üretilen biyogaz miktarından daha fazla miktarda metan üretilmektedir [36].

Kofermantasyon ile biyogaz üretiminin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır [38]:

Avantajları;

- Daha iyi besin dengesi sağlanmaktadır,
- Farklı tipteki atıkların homojenizasyonu ve birlikte daha kolay parçalanması sağlanmaktadır,
- Biyogaz üretim verimi arttırılmaktadır,
- Daha küçük hacimde daha fazla biyogaz üretilmektedir.

Dezavantajları;

- Farklı substratların kullanımı için gerekli olan yasal izinlerin alınması,
- Kullanılacak olan her substrat için ek kabul birimi, depo, pompa vb. yapı ve ekipman gereksinimi,
- Sürekli ve kaliteli substrat temin edilmesi,
- Bazı durumlarda ön arıtma gereksinimi olması,
- Karıştırma gereksinimi olması,
- Reaktör çıkışında yüksek KOİ içeriğine sahip atıkların ortaya çıkması.

1.4. Yapay Sinir Ağları (YSA)

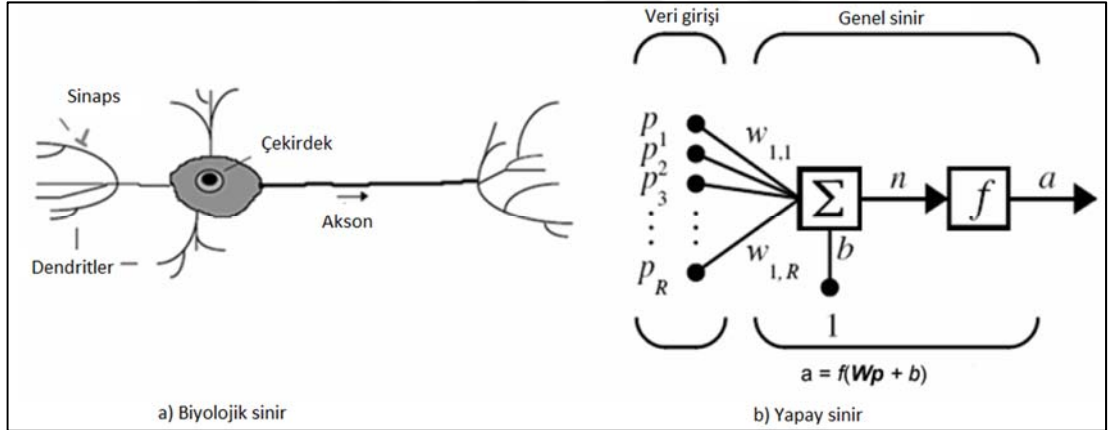
Geleneksel olarak kullanılan sıralı mantık temelli sayısal hesaplama yöntemleri birçok alanda kolaylıklar sağlamaktadır. Ancak farklı türdeki problemlerin çözümünde çok fazla başarılı olamamıştır. YSA 1800'lerin sonlarında, insan beyninin nasıl çalıştığını anlayabilmek için tanımlanmıştır. Ancak bilgisayar alanında gerçekleşen hızlı ilerlemenin gölgesinde kalması ve başlarda üretilen modellerin yeteneklerinin fazla abartılı olduğu şüphesi nedeniyle çok fazla gelişim kaydedilememiştir. Son yıllarda YSA kullanımına ilginin artmasının birkaç nedeni vardır. Daha zor problemlerin çözümünde kullanılmak üzere daha basit eğitim teknikleri geliştirilmiştir. Daha hızlı bilgisayarların kullanılması ile daha hızlı ağ simülasyonlarının yapılabilir olması sağlanmıştır. YSA'lar için özel yazılımlar geliştirilmiştir [39].

YSA birçok alanda farklı nedenlerle araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Elektrik mühendisleri tarafından sinyal işleme ve kontrol teorileri alanında birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bilgisayar mühendisleri tarafından donanımın sinir

ağlarını verimli bir şekilde uygulamak ve robotik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca bilgisayar bilimcileri yapay zekâ ve örüntü tanıma gibi alanlarda zor problemlerin çözümünde oldukça başarılı sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir. Uygulamalı matematikçiler için YSA, bazı değişkenler arasındaki ilişkileri tam olarak bilinmeyen problemleri modellemek için kullanılabilen güçlü bir araçtır [39].

Genel olarak YSA insan beyninin çalışma prensibini taklit etmeye çalışan bilgisayar bazlı biyolojik sinir sistemleri olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 1.6). YSA insan bilişinin ve sinir biyolojisinin matematiksel modellerinin genelleştirilmesi olarak geliştirilmiş olup varsayımlara dayanmaktadır [39,40]. Bir sinir ağı [39];

- Nöronlar arasındaki bağlantı modeline (mimari yapısı),
- Bağlantılarındaki ağırlıkları belirleme metoduna (eğitim veya öğrenme algoritması),
- Aktivasyon fonksiyonuna göre karakterize edilir.



Şekil 1.6. Biyolojik ve yapay sinirler a) Biyolojik sinir hücresi b) Yapay sinir hücresi

YSA nöronlar, birimler, hücreler ve düğümler gibi birçok tekil işleme elementinden oluşmaktadır. Her bir nöron diğer nöronlara ağırlıklarla ilişkilendirilmiş bağlantılar vasıtasıyla bağlıdır. Ağırlıklar, sinir ağı tarafından bir problemin çözümünde kullanılan bilgileri temsil eder. Her bir nöron aldığı girdilerin bir fonksiyonu olan aktivasyon veya aktivite seviyesi adı verilen bir iç duruma sahiptir. Genellikle bir nöron, aktivasyonunu birkaç farklı nörona bir sinyal olarak gönderir. Bir sinir sinyalinin birkaç başka nörona yayınlanmasına rağmen, bir sinir hücresinin bir seferde sadece bir sinyal gönderebilmektedir [39].

YSA öğrenme, öğrenilen bilgiyi depolama ve ağırlıklarla bağlantılı birçok nörondan oluşan bir sistem kullanarak genelleme yapabilme gibi insana özgü özellikler sergileyebilmektedir [41]. Bu özellikleri sayesinde güçlü bir bilgi işleme kapasitesine sahiptir.

1.5. Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

YSA' analizde kullanılan ağ modeline bağlı olarak farklı özellikler gösterebilmektedir. Ancak YSA'nın temel birkaç özelliği bulunmaktadır;

1.5.1. Doğrusal olmama

YSA'lar, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi, modelin herhangi bir ön koşulu olmadan sürekli bir işleve veya türevine yakınsama yeteneğine sahiptir. Bu nedenle, Evrensel Fonksiyon Yaklaşımcıları olarak adlandırılırlar [42]. Bu özelliği sayesinde karmaşık problemlerin çözümünde oldukça başarılıdırlar [43].

1.5.2. Öğrenebilirlik

YSA'nın en önemli özelliklerinden bir tanesi öğrenme yeteneğine sahip olmasıdır [44]. YSA verilen giren ve çıkan veriler arasındaki ilişkiyi öğrenir ve öğrendiği bilgiyi, herhangi bir model ön depolaması olmaksızın sinaptik ağırlıklar ile dağıtık hafızasında depolayabilir [43].

1.5.3. Genelleme

YSA bilinen örnekleri kullanarak öğrenme özellikleri ile daha önce görmedikleri veriler için genelleme yaparak sonuç üretebilmektedir. Başka bir deyişle YSA eğitim sırasında kullanılmayan veriler için, öğrendikleri bilgiyi kullanarak anlamlı sonuçlar üretebilmektedir [45].

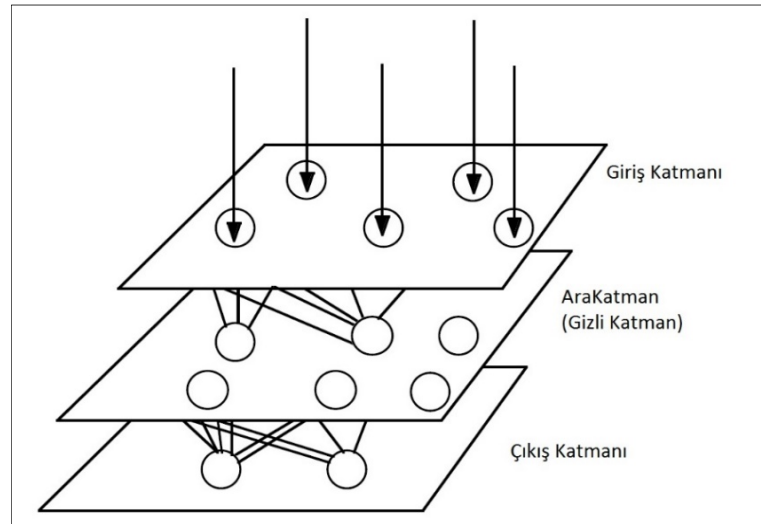
1.5.4. Uyarlanabilirlik

YSA'da işlenen problemde meydana gelen değişikliklere göre işlem elemanlarının ağırlıkları ayarlanabilmektedir. Böylece çözümü istenen problem için eğitilen YSA, problemde ortaya çıkan değişikliğe göre tekrar eğitilebilmektedir [43]. Ayrıca diğer

istatistiksel metotlara göre YSA herhangi bir dönüşüme gereksinim duymadan sınırsız sayıda değişken ve parametre ile çalışabilmektedir [45].

1.6. YSA'nın Yapısı

Temel olarak bütün YSA'lar benzer bir yapıya veya topolojiye sahiptir [46]. Genel olarak YSA birbirlerine ağırlıklarla bağlı üç katmandan (giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı) oluşur (Şekil 1.7). Genellikle giriş katmanında işlem yapılmaz ve giriş katmanı sinirsel işlem birimleri tabakası olarak ele alınmaz. Giriş birimi sadece çıkış yelpazesi düğümüdür. Giriş katmanı daha çok bir girdi vektörü olup daha sonraki katmanlarda sinirsel olarak işlenecek verilerin girilmesini sağlar. Çıktı tabakası işlenen verileri çıktı olarak dışarı ileten nöronları içermektedir. Girdi ve çıktı tabakaları arasında gizli tabaka bulunmaktadır ve gizli tabaka tek tabaka olabileceği gibi birden fazla tabakadan oluşabilmektedir. Gizli tabaka nöronları, doğrusal olmayan ve türevlenebilir aktivasyon işlevlerine sahiptir. Gizli katmanın doğrusal olmayan aktivasyon işlevlerini yapabiliyor olması, sinir ağının evrensel bir yaklaşımçı olmasına olanak tanır. Aktivasyon işlevinin doğrusal olmaması gösterim probleminin çözülmesini sağlar [40].



Şekil 1.7. Basit bir sinir ağı diyagramı [40]

1.7. YSA'nın Dezavantajları

YSA'nın avantajlı kullanımının yanında birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Hızlı analiz yapılabilmesi için oldukça hızlı işlemciye sahip bilgisayarlar gerekmektedir.
- Bazı problemler YAS kullanılarak çözümlenemez veya çözüm sonucunda elde edilen sonuçlar gerçek değerler ile alakalı olmayabilir.
- Problemin çözümü için seçilen YAS yapısının en iyi sonucu verdiğinin bir garantisi yoktur.
- Problemin çözümünde uygun ağ yapısının belirlenmesinde belirli bir kural yoktur.
- Ağın eğitiminin ne zaman bitirmesi gerektiğini gösteren bir yöntem yoktur.

1.8. Literatür Taraması

İlk üretildiği günden itibaren günümüze kadar farklı substratlardan biyogaz üretimi ve üretilen biyogaz miktarının artırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Biyogaz üretimini artırma yöntemlerinden bir tanesi de kofermantasyon ile biyogaz üretimidir. Literatürde sığır gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu kullanılarak yapılmış olan bazı çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Dias ve arkadaşları [47] yaptıkları çalışmada ön arıtımı yapılmış sığır gübresi ve belirli süre bekletilmiş olan armut atıklarının anaerobik kofermantasyonu çalışmışlardır. Çalışmada %0, %25, %75 ve %100 lük içerikler çalışılmıştır. İçerik oranları sığır gübresinin uçucu katılarının yerine armut atıklarının uçucu katıları gelecek şekilde belirlenmiş ve organik yükleme oranı $1,1 \pm 0,4$ g VS/L.d olarak korunmuştur. Yardımcı substratın kullanılmasıyla metan üretim hızında bir artış gözlenmiştir. Tek başına atığın anaerobik fermantasyonu durumuna göre 1,3-2,8 kat daha fazla metan üretimi gerçekleşmiştir. Toplam performansa bakıldığında ise 25/75 (sığır gübresi/armut atığı) oranından optimum şartlar sağlanmıştır.

Marañón ve ark. [48] sığır gübresi, yemek atıkları ve arıtma çamurunun kofermantasyonunu çalışmışlardır. Biyogaz verimini artırmak amacıyla, mezofilik ve termofilik şartlarda sürekli karışimli tank reaktörlerde farklı hidrolik bekletme sürelerinde bir dizi denemeler yapılmıştır. Ultrason ile ön arıtımı yapılmış olan atıklar

ile ön arıtım uygulanmamış olan atıklar için denemeler yapılarak karşılaştırmışlardır. Organik yükleme oranının artırılması ve hidrolik bekletme süresinin düşürülmesi ile spesifik metan üretiminin düştüğü gözlenmiştir. Maksimum değer olan 603 L CH₄/kg VS_{feed} değerine, %70 gübre, %20 yemek atığı ve %10 arıtma çamuru karışımında, 36 °C sıcaklık ve 1,2 gVS/L.day organik yükleme oranında ulaşılmıştır. Organik yükleme oranının 1,5 gVS/L.day'e yükseltilmesi sonrasında spesifik metan potansiyelinde %20-28 civarında düşüş olduğu gözlenmiştir. 55 °C sıcaklıkta daha düşük metan oranları elde edilmiştir.

Borowski ve ark. [49] bu çalışmada evsel atıksu arıtma çamuru, domuz gübresi ve kanatlı gübresinin anaerobik arıtımı çalışılmıştır. Evsel arıtma çamuruna %30 domuz gübresi eklendiği durumda 400 dm³/kg VS biyogaz üretimi gerçekleşmiştir. Üçlü çalışmada ise (AÇ:DG:KG=70:20:10 ağırlıkça) maksimum biyogaz üretimi 336 dm³/kg VS olarak ölçülmüştür. Metanlaşma aşamasında serbest amonyak nedeniyle kanatlı gübresinin kullanıldığı çalışmalarda inhibisyon olduğu gözlenmiştir.

Callaghan ve ark. [50] yaptıkları çalışmalarda sığır gübresine, meyve-sebze atıklarının ve tavuk gübresinin eklenmesinin etkilerini araştırmak amacıyla 18 litrelik sürekli karıştırılmalı tank reaktör kullanmış ve çalışmayı mezofilik (35°C) şartlarda yürütmüşlerdir. Bekletme süresi 21 gün olarak ayarlanmış ve yükleme oranı ise 3,19-5,01 kg VS/m³.d olarak belirlenmiştir. Meyve sebze atıklarının oranının %20 ile %50 arasında artırılması sonucunda metan veriminde 0,23 ile 0,45 m³CH₄/kg VS arasında bir artış gözlenmiştir. Tavuk gübresi miktarının artırılması sonucunda ise reaktör performansını olumsuz yönde etkileyecek şartlar ortaya çıkmıştır. Bu durumun amonyak inhibisyonundan kaynaklandığı gözlenmiştir.

Rico ve ark. [51] yaptıkları çalışmada mezofilik anaerobik şartlar altında peynir altı suyunun arıtım sınırlarının ve organik yükleme oranının belirlenmesi amacıyla, peynir altı suyu ve inek gübresinin sıvısından ayrılmış olan kısmının kofermantasyonunu denemişlerdir. Çalışmalar sürekli karıştırılmalı bir tank reaktörde gerçekleştirilmiştir. Hidrolik bekletme süresi 15,6 gün olan reaktörde, peynir altı suyu oranının %85'e varan oranlarda kofermantasyon işlemi başarılı bir şekilde yürütülmüştür. Prosesin verimi ise peynir altı suyu oranının %15-85 aralığındaki oranlarında benzer olarak bulunmuştur. Artan yükleme oranlarının etkisini belirlemek amacıyla, hidrolik

bekletme süresi kademeli olarak düşürülmüştür. Hidrolik bekletme süresinin düşürülmesi ile reaktör veriminin de düştüğü gözlenmiş ancak hidrolik bekletme süresinin 8,7 gün olduğu durumda stabil bir reaktör işletmesi sağlanabilmiştir. Bu şartlar altında hacimsel metan üretim hızı $1,37 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{gün}$ olarak elde edilmiştir.

Shilton ve ark. [52] yaptıkları çalışmada inek gübresi ile birincil arıtma çamuru ve peynir altı suyunun kofermantasyonunu incelemiştir. Yapılan çalışmada tam ölçekli birincil çamur çürütücüyü taklit etmek amacıyla tezgah üstü reaktörler kullanılarak reaktörler $2,4 \text{ kg KOI}/\text{m}^3.\text{gün}$ organik yükleme oranı ve 20 günlük hidrolik bekletme süresinde çalıştırılmıştır. Peynir altı suyunun birincil arıtma çamuru ile kofermantasyonunda, yükleme oranı $3,2 \text{ kg KOI}/\text{m}^3.\text{d}$ 'de sürekli tutularak, gaz üretiminde birincil çamur ile karşılaştırıldığında %151 daha fazla gaz üretimi gerçekleşmiştir. Peynir altı suyunun birincil arıtma çamuru ile kofermantasyonunda, kimyasal alkalinite eklenmesi, organik yükleme oranının yükseltilebilmesine olanak sağlarken, üretilen gaz miktarının %208 oranında artmasını sağlamıştır. Ayrıca kimyasal ilavesi yerine inek gübresi ilave edildiğinde stabil işletme şartları sağlanabilirken, organik yükleme oranı $5,2-6,9 \text{ kg KOI}/\text{m}^3.\text{d}$ sağlanabilmiş ve gaz üretimi %268 artmıştır.

Öztürk [53] yaptığı çalışmada inek gübresi, peynir altı suyu ve kan kullanarak biyogaz üretimini çalışmıştır. Sırasıyla biyogaz üretim oranları gübre için $0,63 \text{ l/dk}$, gübre ve peynir altı suyunun kofermantasyonu için $0,72 \text{ l/dk}$, gübre ve kan için $0,64 \text{ l/dk}$ olarak bulunmuştur. Anaerobik bakteriler için C:N oranı kadar fosfor ve uçucu katı maddelerin miktarı da önemlidir. Gübrenin 30 günlük anaerobik parçalanması sonrasında %54 uçucu katı madde giderimi, %52 fosfor giderimi sağlanmıştır. 30 günlük süre sonunda, toplam azot miktarında %10 azalma sağlanırken bütamonyum nitrojen miktarında %46 artış gözlenmiştir. Kofermantasyon sırasında gübre peynir altı suyunun ve kanın aşılmasını ve tamponlanmasını sağlayarak onların birer enerji kaynağına dönüşmesini sağlamıştır. Peynir altı suyu ve kanın gübre ile kofermantasyonu sırasında yaklaşık olarak sırasıyla %52 ve %34 KOİ giderimi sağlanmıştır.

Peynir altı sularının anaerobik kofermantasyonu üzerine yapılan çalışmalarda tamponlama kapasitesinin yüksek olmasından dolayı genellikle büyükbaş hayvan gübresi ile birlikte çalışıldığı görülmektedir.

Comino ve ark. [54] gerçekleştirdikleri çalışmada sığır gübresi ve peynir altı suyunun farklı karışım oranlarında metan üretim hızı, KOİ ve BOİ giderim verimleri ve biyogaz üretim hızlarını değerlendirilmişlerdir. %50 sığır gübresi ve %50 peynir altı suyu karışımının kullanıldığı denemede, 621 l/kg uçucu katı oranında ve 42 günlük hidrolik bekletme süresinde stabil bir biyogaz üretimi gözlenmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriği ise yaklaşık olarak %55'dir. Maksimum KOİ giderim verimi %82 ve BOİ giderim verimi ise %90 olarak belirlenmiştir. Maksimum biyogaz üretimindeki artış %79 ile başlangıç fazında elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları yüksek peynir altı suyu hacimlerinde (%65'e kadar), kimyasal kullanılmadan pH düzeltmesinin yapılabildiğini göstermektedir.

Kavacık ve Topaloğlu'nun [55] yaptıkları çalışmada peynir altı suyu ve inek gübresinin farklı oranlarda karıştırılarak günlük olarak biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği belirlenmiştir. Ayrıca KOİ, toplam katı madde ve toplam uçucu katı madde giderim verimleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda %8 ve %10 olmak üzere iki farklı katı madde oranı çalışılmıştır. Hidrolik bekletme süresi ise 5, 10 ve 20 gün olarak belirlenmiştir. Her bir hidrolik bekletme süresinde giderim verimleri ve üretilen biyogaz miktarı belirlenmiştir. Maksimum günlük biyogaz üretimi 5 günlük bekletme süresinde, 1.510 m³/d olarak, %8 toplam katı madde içeriğinde ve 34 °C'de sağlanmıştır. Maksimum giderim verimleri toplam katı madde için %49,5, uçucu katı madde için %49,4 ve KOİ için %54 olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada ise Comino ve ark.[56] inek gübresi ile peynir altı suyu karışımının anaerobik parçalanmasını çalışılmışlardır. Çalışmalarda 128 litre iç hacme sahip, kesikli ve kesikli beslemeli çalışma şartlarında çalışabilen pilot ölçekli bir anaerobik reaktör geliştirilmiştir. Cihazın çok yönlü ve eşsiz özellikleri, çiftlikte doğrudan metan üretimini test etme olanağı sağlamıştır. Reaktör performansı iki kalibrasyon testi ile değerlendirilmiş olup, temel olarak 56 gün sürmüştür. Çalışma besleme işlemine göre üç faz olarak bölünmüştür (kesikli, kesikli beslemeli, kesikli). Başlangıç fazında metan üretimi 57 L/CH₄/kgVS, ikinci fazda metan üretimi 86,6 L/CH₄/kgVS ve üçüncü fazda

211,4 L CH₄/kgVS olarak bulunmuştur. Toplam metan üretimi 211,4 L CH₄/kgVS olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar tam ölçekli bir tesise uygulandığında 8,86 kWh 1 t/d elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar inek gübresi ile peynir altı suyu karışımının biyogaz üretiminde iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Rico ve ark. [57] yaptıkları çalışmada inek gübresinin sıvı kısmını yardımcı substrat olarak kullanmışlar ve inek gübresi ile peynir altı suyunun kısa bekletme sürelerinde ve yüksek organik yükleme oranlarında anaerobik arıtılabilirliğini çalışmışlardır. Önerilen kofermantasyon prosesi tek aşamalı bir UASB reaktör ve çıkış suyunu devir daim ettiren bir harici çöktürücüden oluşmaktadır. Çıkış suyunun devir daim ettirilmesi ile ilave alkalinite ihtiyacı karşılanmaktadır. Sabit bir hidrolik bekletme süresinde (2,2 gün) ve artan peynir altı suyu oranlarında sistem %75 peynir altı suyu oranına kadar stabil bir işleyiş göstermiştir. Bu durumda %94,7 KOİ giderimi ve 6,4 m³CH₄/gün metan üretim hızı elde edilmiştir. Peynir altı suyu oranının %85 olduğu durumda kritik biyokütle yıkanması gözlenmiştir. Karışımdaki peynir altı suyu oranı %60'da sabit tutulduğunda ve organik yükleme oranı 28,7 kgKOİ/m³gün, bekletme süresi 1,3 gün olduğunda %95,1 KOİ giderim verimi ve 9,5 m³CH₄/gün hacimsel metan oranı elde edilmiştir.

Bertin ve ark. [58] bu çalışmada peynir altı suyu ve sığır gübresinin kofermantasyonunu geliştirmek için yenilikçi iki kademeli, asidojenik ve metanojenik fazların tek merkezli olduğu bir proses kullanmışlardır. Optimum peynir altı suyu/sığır gübresi oranı için kesikli şartlar kullanılmıştır. Daha sonra sürekli akış şartlarında tek kademeli ve iki kademeli kofermantasyon prosesi uygulanmıştır. Sonuçlar sığır gübresi ile peynir altı suyunun birlikte kofermantasyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. En yüksek metan üretim verimine, iki kademeli yenilikçi prosesin ön arıtım olarak kullanıldığı durumda ulaşılmıştır. Önerilen sistem ile maksimum 258 mlCH₄/gVS değerine ulaşılmıştır ve bu değer tek kademeli proseste elde edilen değerinkine yaklaşık olarak iki katı elde edilmiştir.

Hublin ve ark. [59] yaptıkları çalışmada ise peynir altı suyu ve inek gübresinin kofermantasyonu sonucunda biyogaz üretmek için seri halinde kesikli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Karışım içerisindeki peynir altı suyunun miktarının biyogaz

üretimine etkisi 35 ve 55 °C sıcaklıkta değerlendirilmiştir. Deneyle 12 gün boyunca sürdürülmüş olup farklı başlangıç pH'larında ve farklı ek bikarbonat konsantrasyonlarında denemeler yapılmıştır. Biyogaz karışımının optimum proses şartlarında 6,6 dm³/dm³ biyogaz üretimi, %79,4 metan içeriği ve %16 toplam katı giderimi %16 olarak elde edilmiştir. Peynir altı suyu ve inek gübresinin tek kademeli kesikli proseste 45 günlük denemeler optimum şartlarda sürdürülmüştür. Yapılan denemeler sonucunda biyogaz üretim miktarı 21,8 dm³/dm³, biyogaz içeriği %78,7, toplam katı giderim verimi %32,3 ve kimyasal oksijen ihtiyacı giderimi ise %56,3 olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar peynir altı suyunun inek gübresi ile kofermantasyonu sonucunda verimli bir şekilde parçalanabildiğini göstermiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle ana substrat olarak büyükbaş hayvan gübresi kullanılmıştır. Büyükbaş hayvan gübresi ile tavuk gübresi, büyükbaş hayvan gübresi ile peynir altı suyu, tavuk gübresi ile peynir altı suyu birlikte kullanılarak biyogaz üretmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ancak literatürde bu üç atığın birlikte kullanılarak kofermantasyonunun gerçekleştirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gerçekleştirilen çalışmada büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyundan kofermantasyon yöntemi ile biyogaz üretimi gerçekleştirilmiş ve biyogaz üretimi için farklı çalışma koşulları denenmiştir.

YSA anaerobik fermantasyon proseslerinde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Parthiban ve ark. [60] hint irmiği üretiminden kaynaklanan atıksuların, konik akışkan yataklı anaerobik reaktörde arıtım parametrelerinin modellenmesinde YSA'yı kullanmışlardır. Modelleme için arıtım prosesindeki altı deneysel parametre dikkate alınmıştır. Giriş parametresi olarak akış hızı, pH, KOİ ve hidrolik bekleme süresi, çıkış parametresi olarak ise çıkış KOİ'si ve CH₄ gaz verimi kullanılmıştır. Geliştirilen sinir ağı tahmin sonuçları deneysel sonuçlara oldukça yakın bulunmuştur. Sinir ağı modeli ise tekrar edilen testler ile doğrulanmıştır. Tüm test verilerinin sinir ağı modeli ile regresyon analizi uyumu 0.99924 olarak bulunmuştur.

Strik ve ark. [61] MATLAB 6.5 programının YSA aracını kullanarak anaerobik fermantasyonda, biyokütledeki eser bileşikleri (hidrojen sülfür ve amonyak) tahmin edebilen bir YSA modeli geliştirmişlerdir. YSA'nın mimarisi on farklı gizli nöron kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller dinamik koşullar altında eser

bileşikleri hidrojen sülfür için 0,91 ve amonyak için 0,83 R^2 değerleri ile tahmin edebilmektedir. Çalışma sonucunda YSA modellerinin bu tür uygulamalar için öngörücü kontrol araçları olarak kullanılabilceği belirtilmiştir.

Qdais ve ark. [62] metan üretim miktarını tahmin edebilmek için anaerobik fermantasyon prosesini simule edebilen, iki gizli katmandan oluşan birçok katmanlı YSA modeli geliştirmişlerdir. Modelin geliştirilmesinde Russaifah biyogaz tesisinden alınan veriler kullanılmıştır. Russaifah biyogaz tesisinde biyogaz üretimi amacıyla meyve sebze marketlerinden gelen atıklar, restoran atıkları, mezbaha atıkları ve mandıra atıkları kullanılmaktadır. Giriş parametresi olarak sıcaklık, pH, toplam katı madde ve toplam uçucu katı madde kullanılmıştır. Çıkış parametresi olarak ise üretilen biyogazın CH_4 içeriği kullanılmıştır. Geliştirilen model deneysel sonuçlar ile yakın değerler elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca geliştirilen YSA modelinde metan üretimi 0,87 R^2 değerleri ile tahmin edebilmektedir.

Holubar ve ark. [63] MATLAB 5.2 YSA aracını kullanarak anaerobik sürekli karıştırmalı reaktörde metan üretimi modelini geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda elde edilen pH, KO_2 , uçucu yağ asitleri, uçucu katı maddeler, redoks potansiyeli gaz bileşimi ve metan üretim hızı yapay ağı eğitiminde kullanılmıştır. Model anaerobik fermantasyon sürecini simule edebilmekte ve gaz üretim hızını etkili bir şekilde tahmin edebilmektedir. Böylece anaerobik fermantasyon sürecinin, gelişmiş bir karar destek sistemi ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Sistem tarafından kontrol edilen laboratuvar ölçekli anaerobik sürekli karıştırmalı sistemde en yüksek metan oranı %60 olarak elde edilirken en yüksek gaz üretim hızı 5-5,6 aralığında elde edilmiştir.

Jaroenpoj ve ark. [64] yaptıkları çalışmada deneysel verileri kullanarak sızıntı suyu ile ananas kabuklarının anaerobik fermantasyonun sonuçlarını öngörebilmek amacıyla bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen çok tabakalı ileri beslemeli sinir ağı modeli, ortalama karesel hata $2,67 \times 10^{-2}$ ve 0,9942 R değeri ile anaerobik kofermantasyon ile biyogaz üretiminde sağlıklı değerler verebilmektedir. Ayrıca bu yaklaşımın mevcut bilgileri kullanarak doğrusal olmayan verilerin ilişkilendirilmesinde etkili, esnek ve çok yönlü bir uygulama yöntemi olduğu belirtilmiştir.

Yusof ve ark. [65] kanatlı gübresi ve yemek atıklarının kofermantasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Tepki yüzeyi metodolojisi ve YSA yöntemlerini kullanarak

tavuk gübresi ve yemek atıklarından biyogaz üretimini optimize etmek amacıyla farklı karışım oranları, başlangıç pH değerleri ve sıcaklıkları kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak tepki yüzeyi metodolojisi ve YSA sonuçları karşılaştırılmıştır. Tepki yüzeyi metodolojisi ve YSA kullanılarak optimizasyonu sonucunda elde edilen verilerin deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu belirtilmiştir. R^2 değerleri tepki yüzeyi metodolojisi için 0,991 iken YSA için 0,998 olarak elde edilmiştir. Tepki yüzeyi metodolojisi ile yapılan çalışmada 80:20 (KG:YA) oranında, 35 °C sıcaklıkta ve 7,11 başlangıç pH değerinde maksimum metan verimi 537 mL CH₄/g VS olarak elde edilmiştir. YSA yöntemi ile yapılan çalışmada ise yine aynı koşullarda 538 mL CH₄/g VS metan verimi elde edilebileceği tahmin edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda her iki yöntemin de anaerobik kofermantasyon ile biyogaz üretiminde uygun bir tahmin yöntemi olduğu belirtilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Bu çalışmada kofermantasyon yöntemi ile biyogaz üretmek amacıyla büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu kullanılmıştır. Büyük baş hayvan gübresi günlük kesim yapan bir mezbahadan alınmıştır. Mezbahada bulunan hayvanlar üzeri örtülü, zemini geçirimsiz bir alanda bulundurulmaktadır. Hayvanların altında biriken gübreler günde 3 kez çalışanlar tarafından temizlenmektedir. Büyükbaş hayvan gübresinin içeriğinde hayvanın yemlenmesi sırasında dökülen yemler, hayvanın dışkısı ve idrarı bulunmaktadır. Denemelerde kullanılan gübreler günlük olarak temin edilmiş ve taze bir şekilde kullanılmıştır.

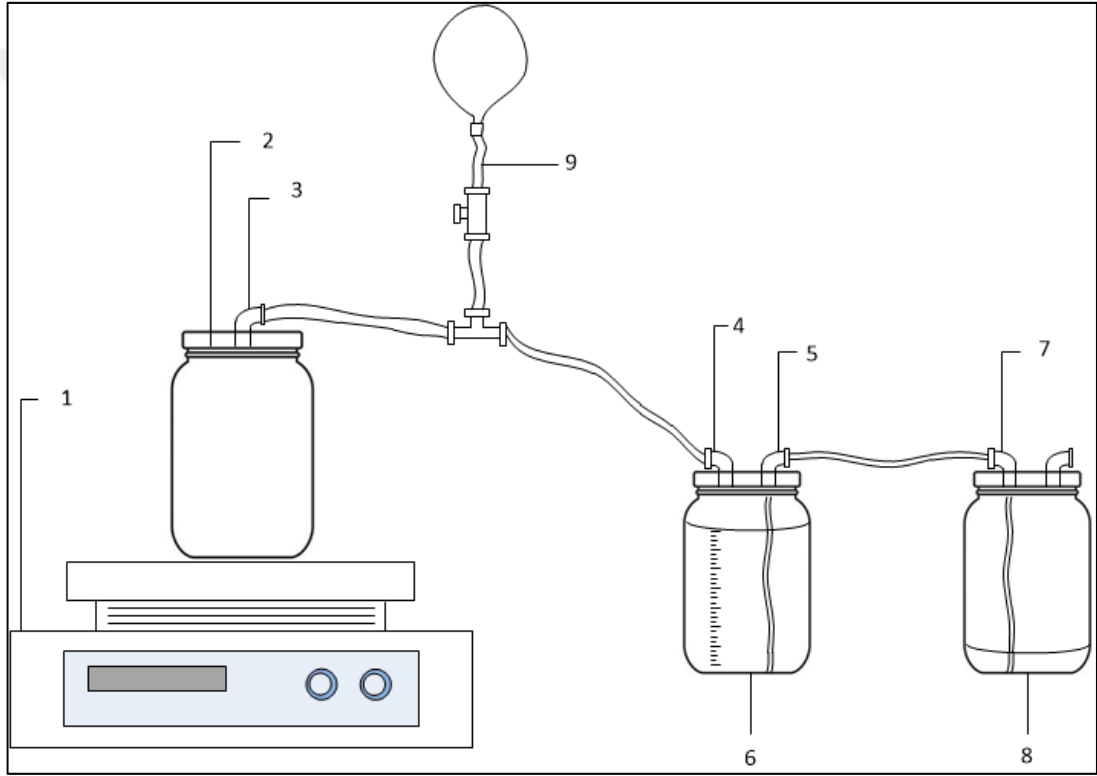
Denemelerde kullanılan tavuk gübresi yumurta üretimi yapan bir çiftlikten temin edilmiştir. Yumurta üretimin yapıldığı çiftlikte tavuklar 3 katlı kümeslerde beslenmektedir. Tavuklardan çıkan gübreler bir bant vasıtasıyla toplanarak bir alanda biriktirilmektedir. Temizleme işlemi günde 1 defa yapılmaktadır. Denemelerde kullanılan tavuk gübresi günlük temizlik sonrasında, toplama alanında alınmıştır.

Peynir altı suyu ise süt ve süt ürünleri üretimi yapan bir firmadan temin edilmiştir. Peynir altı suyunun kolay bozunabilir yapısı nedeniyle üretim sonrasında alınıp taze bir şekilde kullanılmıştır.

Denemelerde başlangıçta biyogaz üretim süresini kısaltmak amacıyla aşı kullanılmıştır. Kullanılan aşı Karabük Üniversitesi Enerji ve Çevre Teknolojileri Birimi Biyogaz Laboratuvarında bulunun ve çalışmakta olan 6 m³ hacimli reaktörden alınmıştır.



Şekil 2.2. Deney düzeneği 1



Şekil 2.3. Deney düzeneği 2 (1. Isıtıcıly manyetik karıştırıcı, 2. Reaktör, 3. Gaz çıkışı, 4. Gaz girişı, 5. Su çıkışı, 6. Gaz toplama şişesi, 7. Su girişı, 8. Su toplama şişesi, 9. Gaz örnek alma vanası)



Şekil 2.4. Deney düzeneği 2

2.3. Analiz Metotları

Kuru madde analizi SM 2540 D standart metoduna uygun olarak gravimetrik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Etüv

Uçucu kuru madde analizi SM 2540 B standart metoduna uygun olarak gravimetrik olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6. Kül fırını

KOİ analizi SM 5220 B standart metoduna uygun olarak Closed-refluxed yöntemi ile titrimetrik olarak ölçülmüştür.

Karbon ve azot oranları, elementel analiz ile ASTM D-5373 standartlarına uygun kalibre edilen Thermo Scientific Flash 2000 elementel analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Potasyum, krom, siyanür, nikel, bakır, çinko ve toplam azot analizleri Hach Lange marka deney kitleri kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan kitler Hach Lange marka spektrofotometrede okutulularak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2.7. Spektrofotometre

Uçucu yağ asidi analizi Shimadzu GC 2010 PLUS marka gaz kromatografi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gaz kromatografi cihazında taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta helyum gazı, dedektör olarak ise FID dedektör kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Gaz kromatografi cihazı

Deneyisel çalışmalar sırasında elde edilen gazların içeriği Geotek biyogaz 5000 marka biyogaz analizörü ile ölçülmüştür.

2.4. Analiz Sonuçları

Çalışmalarda kullanılan büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyunda C, N, H, O, potasyum, krom, siyanür, nikel, bakır, çinko, toplam azot, uçucu yağ asidi ve kimyasal oksijen ihtiyacı tayinleri yapılmıştır. Deneyisel çalışmada kullanılan aşıda ise toplam kuru madde, toplam uçucu kuru madde, karbon ve azot analizleri yapılmıştır. Kullanılan aşı malzemesi için yapılan analizlerin sonuçları Tablo 2.1’de verilmiştir. Büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu için yapılan analizlerin sonuçları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan aşının analiz sonuçları

Analiz	Aşı
TKM (%)	8,54
TUKM (%)	91,37
C (%)	37,22
N (%)	4,68

Tablo 2.2. Büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu analiz sonuçları

Analiz	BBG	TG	PAS
C (%)	43,51	32,15	39,82
N (%)	3,12	7,61	2,11
H (%)	5,5	-	-
O (%)	49,2	-	-
TKM (%)	23,75	31,3	5,81
TUKM (%)	86,72	70,33	91,13
Potasyum (mg/L)	10500	89000	17400
Krom (mg/L)	277	-	211
Siyanür (mg/L)	0,267	0,642	0,476
Nikel (mg/L)	814	3061	470
Bakır (mg/L)	856	3180	247
Çinko (mg/L)	203	839	81,2
VFA (mg/L)	58300	188800	229900
Toplam Azot (mg/L)	13300	-	-
KOI (mg/L)	45310	21200	66500

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Çalışmalar

Denemelerde reaktörler 30 günlük bekletme süresinde, kesikli olarak çalıştırılmıştır. Denemeler 3 farklı adımda gerçekleştirilmiştir. 1. adımda kofermantasyonun büyükbaş gübresine (BBG) etkisini belirlemek amacıyla reaktörler 36 °C sıcaklıkta çalıştırılmış olup karıştırma işlemi günde bir kez manuel olarak gerçekleştirilmiştir. 2. adımda reaktörler 38 °C sıcaklıkta 100 rpm ve 200 rpm karıştırma hızlarında çalıştırılmıştır. Karıştırma ve ısıtma işlemi aralıksız olarak devam ettirilmiştir. 3. adımda ise reaktörler 38 °C ve 50 °C sıcaklıklarda, günde bir kere manuel olarak karıştırılarak çalıştırılmışlardır. Çalışma 2 tekrarlı olacak şekilde yürütülmüştür. 1. adımda toplam 18 adet, 2. adımda toplam 28 adet, 3. adımda ise yine toplam 28 adet reaktör çalıştırılmıştır. Reaktörler kullanılan atıkların toplam kuru madde içeriklerine göre, %50 büyükbaş gübresi ile doldurulmuş olup geriye kalan %50'lik kısım farklı oranlarda tavuk gübresi (TG) ve peynir altı suyu (PAS) ile doldurulmuştur. Kontrol amacıyla hazırlanan reaktörler %100 büyükbaş gübresi, %100 tavuk gübresi ve %100 peynir altı suyu ile doldurulmuştur. Reaktörlerin karışım oranları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. 1. adımda çalıştırılan reaktörler ve atık karışım oranları

Reaktör	BBG %	TG %	PAS %
R1 (BBG kontrol)	100	0	0
R2	50	0	50
R3	50	10	40
R4	50	20	30
R5	50	30	20
R6	50	40	10
R7	50	50	0
R8 (TG kontrol)	0	100	0
R9 (PAS kontrol)	0	0	100

Tablo 3.1’de belirtilen karışım oranları üzerinden her bir reaktör için 100 rpm (100) ve 200 rpm (200) karıştırma hızları için birer reaktör, 38 °C (38) ve 50 °C (50) sıcaklıklar için birer reaktör hazırlanmıştır. Çalışmanın başında ve sonunda olmak üzere pH, TKM, TUKM ve KOİ ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın başlangıcında yapılan analizlerin sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Reaktör analiz sonuçları

Reaktör	pH	KOİ (mg/L)	TKM (%)	TUKM (%)
R1	7,99	51.400	23,78	79,42
R2	6,48	71.500	14,31	91,50
R3	6,7	211.300	16,97	82,71
R4	6,96	253.000	21,73	77,34
R5	7,27	281.900	22,84	71,84
R6	7,63	93.400	27,74	71,52
R7	8,2	91.700	33,71	81,85
R8	7,25	33.700	41,21	78,54
R9	6,48	73.600	6,37	88,57
R1(100)	7,99	45.700	24,88	74,99
R1(200)	7,84	44.900	20,49	71,58
R1(38)	7,86	45.600	23,78	78,49
R1(50)	7,79	44.800	22,54	73,72
R3(100)	6,55	208.000	16,43	82,66
R3(200)	6,51	210.800	15,97	80,34
R3(38)	6,47	227.200	16,97	81,76
R3(50)	6,5	201.600	17,53	84,46
R4(100)	6,78	240.000	19,95	75,98
R4(200)	6,84	224.000	20,38	77,62
R4(38)	6,81	249.600	21,73	76,81
R4(50)	6,85	233.600	20,82	73,59
R5(100)	7,07	275.200	23,10	72,47
R5(200)	7,16	284.800	22,97	72,06
R5(38)	7,08	288.000	22,84	70,94
R5(50)	7,11	294.400	23,45	72,83
R6(100)	7,58	91.200	40,68	77,99
R6(200)	7,51	89.600	39,10	74,96
R6(38)	7,5	92.800	41,72	70,32
R6(50)	7,43	97.600	41,56	71,80

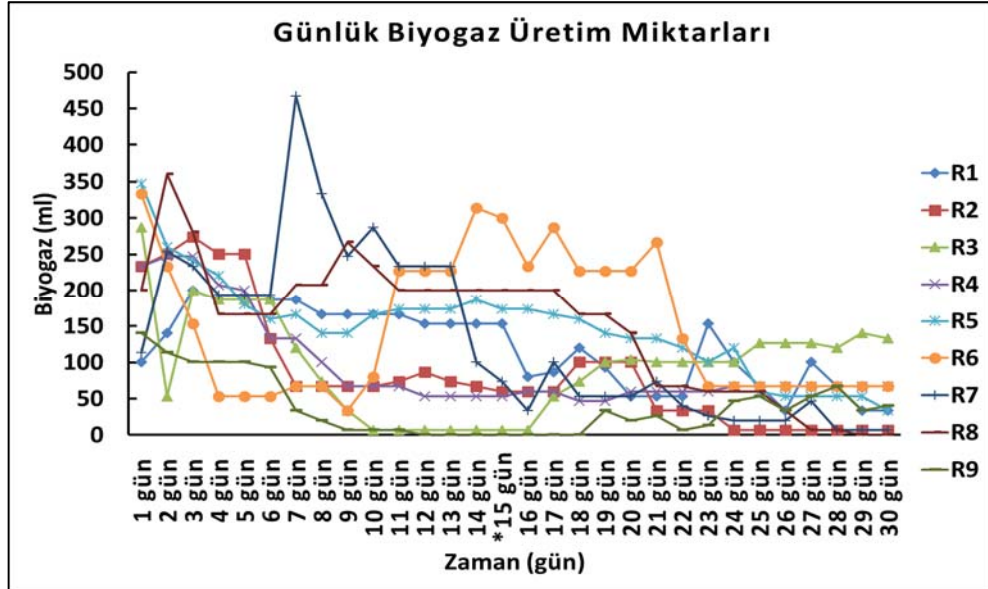
Bütün reaktörler kapatıldıktan sonra reaktör içerisinde tamamen anaerobik bir ortamın sağlanabilmesi için bütün reaktörlerden 5 dk boyunca azot gazı geçirilmiştir. Reaktörlerden azot gazı geçirme işlemi Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Reaktörlerden azot gazı geçirme işlemi

3.1.1. Kofermantasyon denemeleri

Çalışmanın 1. adımında reaktörler 36 °C sıcaklıkta çalıştırılmış olup karıştırma işlemi günde bir kez manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Reaktörlerden biyogaz üretimi günlük olarak takip edilmiştir. Reaktörlerden günlük olarak üretilen biyogaz miktarları Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Reaktörlerden günlük olarak üretilen biyogaz miktarları

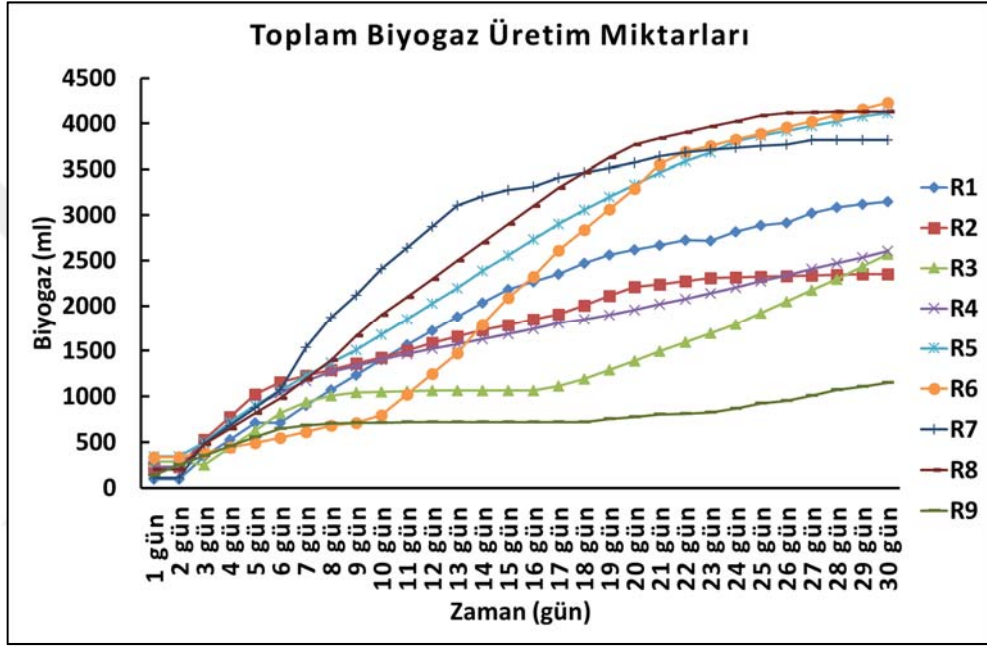
Reaktörlerin günlük biyogaz üretimleri incelendiğinde, atık karışımında peynir altı suyu oranı yüksek olan reaktörlerde (R2, R3, R4, R9) başlangıçta biyogaz üretiminin gerçekleştiği ancak 8. günden sonra biyogaz üretiminin durduğu veya çok azaldığı gözlemlenmiştir. R3 ve R9 numaralı reaktörlerde biyogaz üretimi tamamen dururken, R2 ve R4 numaralı reaktörlerde biyogaz üretimi oldukça yavaşlamıştır. Reaktör içerisindeki mikroorganizmaların çalışmasını ve reaktör içi dengesini en çok etkileyen parametrelerden bir tanesi reaktör içerisindeki pH değeridir ve peynir altı suyunun anaerobik parçalanması sonrasında aşırı pH düşüşü gibi problemler yaşanabilmektedir [51,55,66,67]. Peynir altı suyunun kolay parçalanabilir yapısı nedeniyle asetojenik bakterilerin uçucu yağ asidi üretim hızı, metanojenik bakterilerin uçucu yağ asidini tüketme hızından daha yüksek olmaktadır [68]. Bu durum ortamda uçucu yağ asidinin birikmesine ve ortam pH'nın düşmesine neden olmaktadır [69]. Ortam pH'nın düşmesi ise metan üreten bakterilerin aktivasyonunu yavaşlatmaktadır. Bu nedenle pH düşmesinden dolayı kaynaklanabilecek bir inhibisyonun önüne geçebilmek amacıyla 15. günde reaktörlerin pH değerleri ölçülmüştür (Tablo 3.3).

Tablo 3.3. Reaktörlerin başlangıç ve 15. gündeki pH değerleri

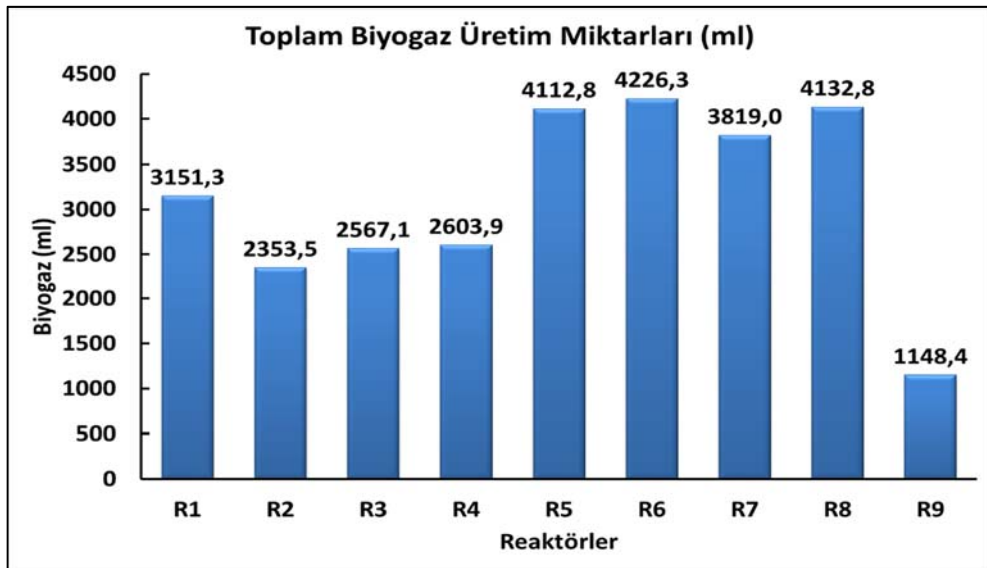
Reaktör	Başlangıç pH değeri	15. Gün pH değeri
R1	7,99	6,78
R2	6,48	4,43
R3	6,7	4,52
R4	6,96	4,81
R5	7,27	5,26
R6	7,63	6,8
R7	8,20	6,54
R8	8,37	7,18
R9	5,79	4,08

pH ölçümü sonrasında R2, R3, R4 ve R9 numaralı reaktörlerde 15 gün sonrasında, pH değerlerinin oldukça düştüğü tespit edilmiştir. Bütün reaktörlerin pH seviyeleri 1 N NaOH kullanılarak 7,00 civarına getirilmiştir. En yüksek peynir altı suyu içeriğine sahip olan R9 numaralı reaktörde en düşük biyogaz üretimi elde edilmiştir. Peynir altı suyu oranının giderek azaldığı R2, R3, R4 ve R5 numaralı reaktörlerde, reaktör içerisindeki karışımın tamponlama kapasitesinin yeterli olmadığı görülmektedir. Tavuk gübresi oranının %40'a yükselmesi ve peynir altı suyu oranının %10'a düşmesi

ile reaktöre herhangi bir kimyasal madde eklenmeden reaktör içerisinde stabil bir biyogaz üretimi sağlanabilmektedir. pH düzeltilmesi sonrasında da R2 ve R9 numaralı reaktörlerde pH düşmesinden kaynaklanan inhibisyonun tolere edilemediği görülmektedir. R3 ve R4 numaralı reaktörlerde pH düzeltilmesi sonrasında biyogaz üretim miktarlarında bir miktar artmış olsa da 30 günlük bekleme süresinin sonunda en düşük biyogaz üretim miktarları sırasıyla R9, R2, R3 ve R4 numaralı reaktörlerde 1148,4 ml, 2103,1 ml, 2380,2 ml ve 2403,6 ml olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.3-3.4).



Şekil 3.3. Reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları



Şekil 3.4. Reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları

En yüksek biyogaz üretimi 4172,8 ml ile R6 numaralı reaktörde gerçekleşmiştir. R6 numaralı reaktörü sırasıyla R8, R5, R7 ve R1 izlemiş olup sırasıyla 4132,8 ml, 4112,7 ml, 3818,9 ml ve 3151,3 ml biyogaz üretimi gerçekleşmiştir.

Reaktörlere beslenen substrat karışımlarının toplam uçucu kuru madde oranlarına karşılık reaktörlerin biyogaz ve metan üretim verimleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriğine bakıldığında en yüksek metan oranı %69,3 ile R5 numaralı reaktörde elde edilmiştir. Biyogaz ve metan üretim verimleri kıyaslandığında en yüksek biyogaz verimi 501,30 ml/gUKM ve en yüksek metan verimi ise 347,40 ml/gUKM ile R5 numaralı reaktörde elde edilmiştir. En düşük biyogaz verimi R8 numaralı reaktörde, en düşük metan verimi ise R9 numaralı reaktörlerde elde edilmiştir.

Borowski ve Weatherley [70] yaptıkları çalışmada arıtma çamuruna %30 tavuk gübresi eklendiğinde üretilen biyogaz miktarının arttığını ancak üretilen biyogazın metan içeriğinin değişmediğini belirtmişlerdir. Diğer yandan Rico ve ark. [51] karışımda peynir altı suyu bulunduğunda üretilen biyogaz metan içeriğinin artacağını bildirmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde ise üretilen biyogaz miktarının karışımdaki tavuk gübresi oranının artması ile birlikte arttığı görülmektedir. Ancak peynir altı suyu oranının yüksek olduğu reaktörlerden elde edilen metan oranları incelendiğinde oldukça düşük olduğu görülmektedir. Diğer yandan sadece büyükbaş gübresinin ve sadece tavuk gübresinin kullanıldığı R1 ve R8 numaralı reaktörlerde sırasıyla %48 ve %53,2 metan oranları elde edilmiştir. Karışımdaki peynir altı suyu oranının en düşük olduğu ve biyogaz içeriğindeki metan oranının en yüksek olduğu iki reaktör olan R5 ve R6 ya bakıldığında ise en yüksek metan içeriğinin peynir altı suyu oranının daha fazla olduğu R5 numaralı reaktörde elde edildiği görülmektedir. Metan oranlarındaki bu artışın Rico ve ark.'nın [51] belirttiği şekilde karışımdaki peynir altı suyundan kaynakladığı düşünülmektedir. Yüksek peynir altı suyu içeriğine sahip olan R2, R3 ve R4 numaralı reaktörlerde ise pH düşüşünden kaynaklanan inhibisyon etkisi pH düzeltmesiyle aşılamamıştır. Bu nedenle bu reaktörlerde üretilen biyogazın metan içeriği de oldukça düşük elde edilmiştir.

Tablo 3.4. Reaktörlerin biyogaz ve metan verimleri

Reaktörler	Toplam Biyogaz Üretimi (ml)	Biyogaz Üretimi Verimi (ml biyogaz/gUKM)	Metan İçeriği (%)	Metan verimi (ml/gUKM)
R1	3151,3	333,72	48	160,19
R2	2353,4	359,48	37,4	134,45
R3	2567,1	365,80	33,6	122,91
R4	2603,8	309,87	42,8	132,63
R5	4112,7	501,30	69,3	347,40
R6	4226,2	426,04	61,8	263,29
R7	3818,9	276,82	54,8	151,70
R8	4132,7	255,38	53,2	135,86
R9	1148,3	407,08	22,3	90,78

Reaktör içerisinde bulunan serbest azot metan üreten bakterilerde metan sentezleyen enzimleri etkileyerek veya hücre içi proton dengesini bozarak anaerobik fermantasyon prosesini etkileyebilmektedirler [50]. Yapılan çalışmalarda 2700-3500 mg/L aralığında amonyum azotu içeren karışımlarda inhibisyon etkisinin görüldüğü bildirilmiştir [71]. Gerçekleştirilen çalışmada Tablo 3.5’de gösterildiği gibi amonyum azotu konsantrasyonları 611,6 mg/L ile 3566,2 mg/L arasında değişmektedir. Tablo 3.5 incelendiğinde reaktör içerisindeki amonyum azotu konsantrasyonunun artan tavuk gübresi oranlarına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Reaktörlerin biyogaz üretim rejimleri incelendiğinde, artan amonyum azotu konsantrasyonlarına rağmen reaktörlerde amonyum azotundan kaynaklanan bir inhibisyondan bahsedilememektedir.

Tablo 3.5. Reaktörlerin amonyum ve serbest azot miktarları

Reaktörler	NH ₄ -N (mg/L)	Serbest Azot (mg/L)
R1	1210,0	65,4
R2	789,6	42,5
R3	1749,5	117,3
R4	1936,2	104,7
R5	2110,9	141,6
R6	2911,6	189,2
R7	3223,1	261,3
R8	3566,2	301,8
R9	611,6	33,9

Reaktörler çalıştırılmaya başlamadan önce ve 30 günlük bekletme süresi sonunda KOİ analizler yapılmıştır. Sonuçlara göre KOİ giderim verimleri belirlenmiştir. KOİ giderim verimleri incelendiğinde reaktörlerin KOİ giderim verimleri %17,11 ile %41,27 aralığında tespit edilmiştir. KOİ giderim verimi %41,27 ile en yüksek R5 numaralı reaktörde tespit edilmiştir (Tablo 3.5). Bu durum büyükbaş gübresinin, tavuk gübresi ve peynir altı suyu ile birlikte kofermantasyonun kirlilik giderimi için çok verimli bir uygulama olmadığını göstermektedir. Farklı atıklar ve farklı reaktörler kullanılarak yapılan çalışmalarda %98'lere varan KOİ giderim verimleri elde edilebildiği belirtilmektedir [53].

Tablo 3.6. Reaktörlerin KOİ giderim verimleri

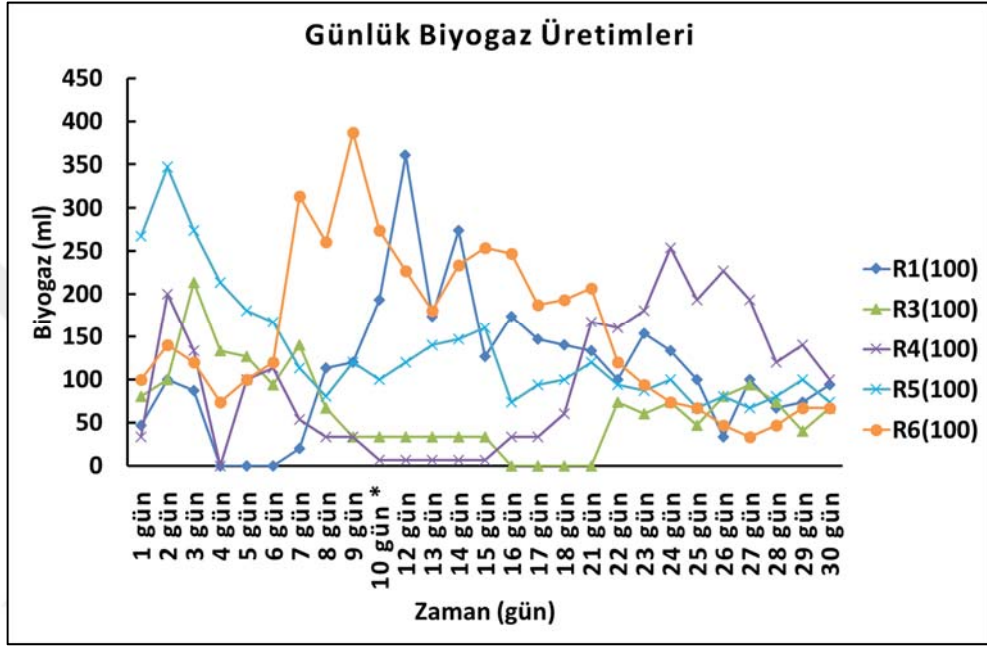
Reaktörler	Başlangıç KOİ (mg/L)	Bitiş KOİ (mg/L)	Giderim Verimi (%)
R1	51400	36231,9	29,51
R2	71500	54940,6	23,16
R3	211300	160228	24,17
R4	253000	192938	23,74
R5	281900	165560	41,27
R6	93400	62026,9	33,59
R7	91700	58578	36,12
R8	33700	25561,5	24,15
R9	73600	61007	17,11

3.1.2. Karıştırma hızı denemeleri

Çalışmanın bu aşamasında karıştırma hızının kofermantasyon üzerine etkisini belirlemek amacıyla R1, R3, R4, R5 ve R6 numaralı reaktörler mezofilik (38 °C) sıcaklık şartlarında 100 rpm ve 200 rpm hızlarında kesikli beslenerek çalıştırılmış ve 100 rpm ve 200 rpm karıştırma hızlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bütün reaktörler eş zamanlı olarak mezofilik şartlar (38 °C) altında çalıştırılmıştır. Karıştırma hızlarının denendiği bu çalışmada R(100) 100 rpm karıştırma hızında anaerobik fermantasyonun gerçekleştirildiği reaktör ve R(200) ise 200 rpm karıştırma hızında anaerobik fermantasyonun gerçekleştirildiği reaktör olarak tanımlanmıştır. Çalışmalarda karıştırma ve ısıtma işlemini sağlamak amacıyla ısıtıcı manyetik karıştırıcılar kullanılmıştır (Şekil 2.3).

3.1.2.1. 100 rpm karıştırma hızı denemeleri

Bu çalışmada R1(100), R3(100), R4(100), R5(100) ve R6(100) numaralı reaktörler denenmiştir. Reaktörler 100 rpm karıştırma hızında ve 38 °C sıcaklıkta 30 günlük bekletme süresince denenmişlerdir. Şekil 3.5’de 100 rpm karıştırma hızında reaktörlerin günlük biyogaz üretim miktarları verilmiştir.



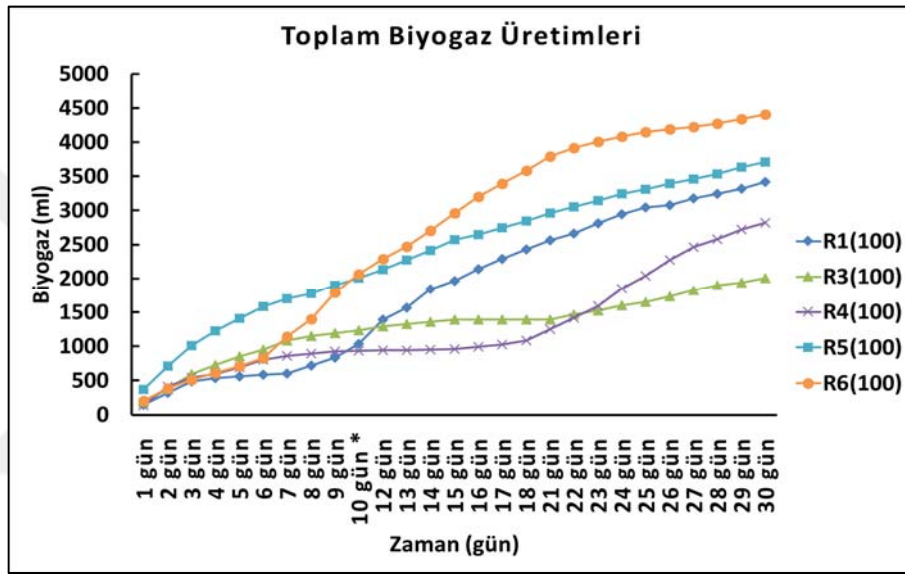
Şekil 3.5. 100 rpm karıştırma hızında günlük biyogaz üretim miktarları

Reaktörler çalıştırılmaya başladıktan 5 gün sonra R1(100), R3(100), R4(100) ve R5(100) numaralı reaktörlerde gaz üretimi yavaşlamaya başlamıştır. Kofermantasyon denemelerinde karşılaşılan durum tekrar etmiş ve pH değerlerinden şüphelenilerek 10. günde pH düzeltilmesi yapılmıştır. Reaktörlere 1 N NaOH eklenerek pH seviyeleri 7 civarına çekilmiştir (Tablo 3.6).

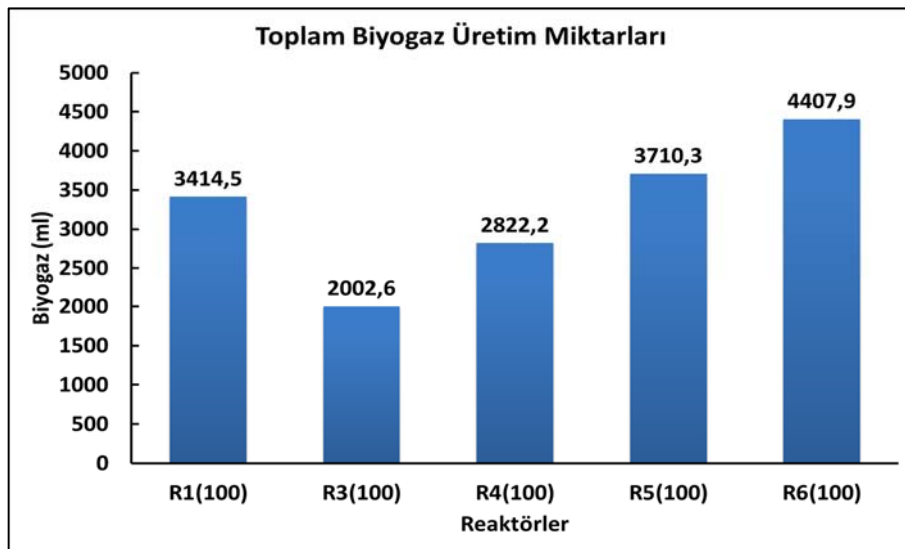
Tablo 3.7. Reaktörlerin pH değerleri

Reaktör	Başlangıç pH değeri	10. gün pH değeri
R1(100)	6,81	6,11
R3(100)	6,55	4,31
R4(100)	6,78	4,12
R5(100)	7,07	5,02
R6(100)	7,58	6,19

Reaktörlerde pH düzeltilmesi yapıldıktan sonra R1(100), R5(100) ve R6(100) numaralı reaktörlerde biyogaz üretim miktarı artarken, R3(100) ve R4(100) numaralı reaktörlerde yaklaşık olarak 10 gün boyunca biyogaz üretim miktarlarında çok fazla değişim gözlenmemiştir. 22. günden sonra ise R3(100) ve R4(100) numaralı reaktörlerde biyogaz üretim miktarında artış olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.6). 30 günlük bekleme süresi sonunda en yüksek biyogaz üretim miktarı 4407,9 ml ile R6(100) numaralı reaktörde elde edilmiştir. En düşük biyogaz üretim miktarı ise 2002,6 ml ile R3(100) numaralı reaktörde elde edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.6. 100 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları



Şekil 3.7. 100 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları

100 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilen çalışmalarda reaktörlerde üretilen biyogazın içeriğine bakıldığında en yüksek metan oranına %69,6 ile R5(100) numaralı reaktörde ulaşılmıştır. R6(100) numaralı reaktörde ise %67,2 ile R5(100) numaralı reaktöre yakın metan üretimi gerçekleşmiştir. Reaktörlerin biyogaz üretim verimleri ve metan verimleri incelendiğinde yine R5(100) numaralı reaktör en yüksek verim elde edilen reaktör olmuştur. R5(100) numaralı reaktörde biyogaz üretim verimi 443,27 ml/gTUKM olarak, metan verimi ise 308,51 mlCH₄/gTUKM olarak elde edilmiştir (Tablo 3.7).

Tablo 3.8. Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği

Reaktörler	Toplam Biyogaz Üretimi (ml)	Biyogaz Üretim Verimi (ml biyogaz/gTUKM)	Metan İçeriği (%)	Metan verimi (ml/gTUKM)
R1(100)	3414,5	365,97	51,1	187,01
R3(100)	2002,6	294,93	45,5	134,19
R4(100)	2822,2	372,37	41,9	156,02
R5(100)	3710,3	443,27	69,6	308,51
R6(100)	4407,9	277,87	67,2	186,73

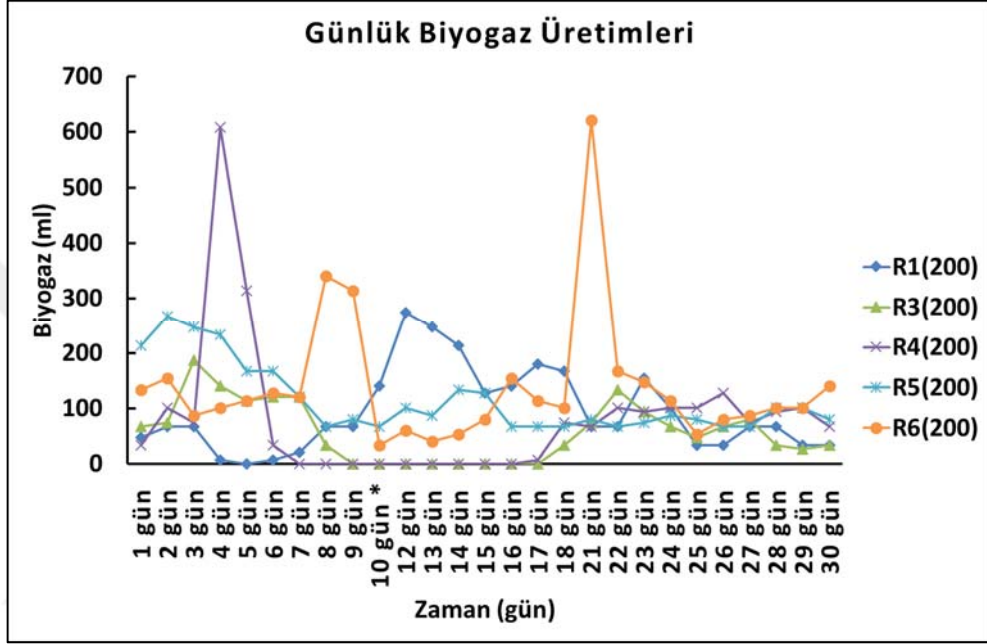
30 günlük bekletme süresi sonunda reaktörlerin KOİ giderim verimleri belirlenmiştir. KOİ giderim verimleri incelendiğinde reaktörlerin KOİ giderim verimleri 21,2-36,9 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi %36,9 ile R6 numaralı reaktörde tespit edilmiştir (Tablo 3.8).

Tablo 3.9. KOİ giderim verimleri

Reaktörler	KOİgiderilen (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)
R1(100)	12.200	26,7
R3(100)	48.700	23,4
R4(100)	50.900	21,2
R5(100)	101.500	36,9
R6(100)	30.200	33,1

3.1.2.2. 200 rpm karıştırma hızı denemeleri

Bu çalışmada R1(200), R3(200), R4(200), R5(200) ve R6(200) numaralı reaktörler denenmiştir. Reaktörler 200 rpm karıştırma hızında ve 38 °C sıcaklıkta 30 günlük bekleme süresince denenmişlerdir. Şekil 3.8’de 200 rpm karıştırma hızındaki günlük biyogaz üretim miktarları verilmiştir.



Şekil 3.8. 200 rpm karıştırma hızında günlük biyogaz üretim miktarları

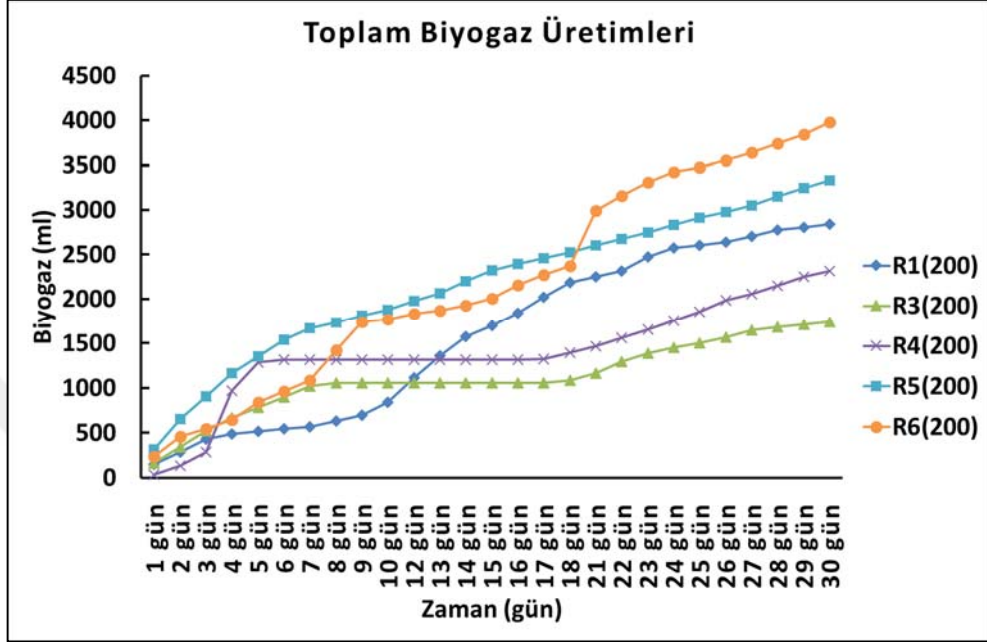
100 rpm ve 200 rpm karıştırma hızlarında gerçekleştirilen denemeler eşzamanlı olarak yürütülmüştür. Bu nedenle 10. günde pH düşmesi nedeniyle tüm reaktörlerde 1N NaOH kullanılarak pH düzeltilmesi yapılmıştır. Reaktörlerin deneme başlangıcında ve 10 gün sonrasında ölçülen pH değerleri Tablo 3.9’da verilmiştir.

Tablo 3.10. Reaktörlerin pH değerleri

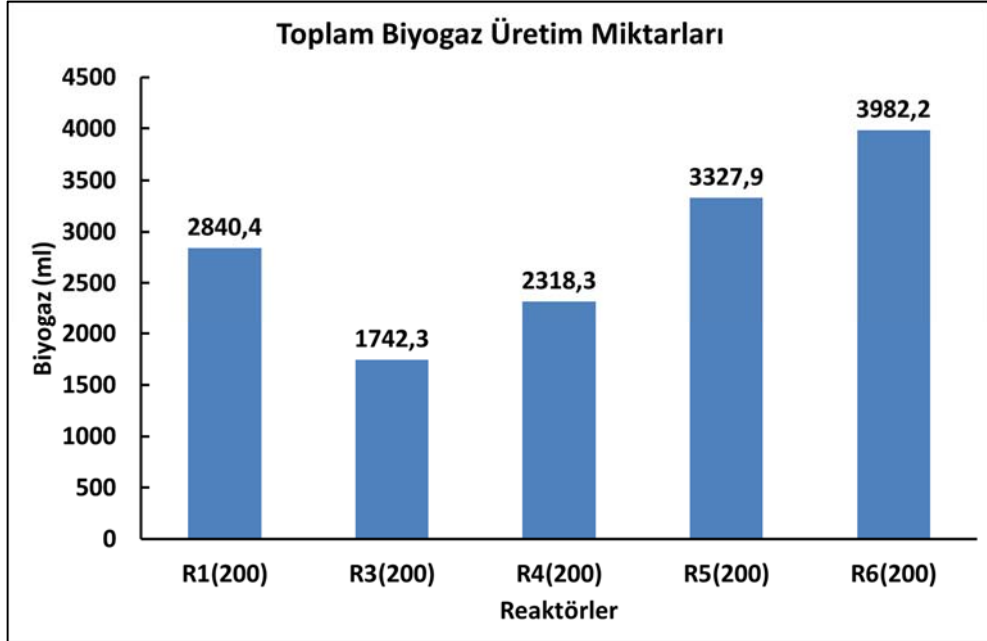
Reaktör	Başlangıç pH değeri	10. gün pH değeri
R1(200)	6,97	6,08
R3(200)	6,51	4,22
R4(200)	6,84	4,19
R5(200)	7,16	5,36
R6(200)	7,51	5,87

pH düzeltilmesi sonrasında 100 rpm karıştırma hızında olduğu gibi R1(100), R5(100) ve R6(100) numaralı reaktörlerde artış olurken R3(100) ve R4(100) numaralı reaktörlerde herhangi bir artış gözlenmemiştir (Şekil 3.9). 30 günlük bekleme süresi

sonrasında en yüksek biyogaz üretimi 3982,2 ml ile R6(100) numaralı reaktörde elde edilmiştir. En düşük biyogaz üretim miktarı ise 1742,3 ml ile R3(100) numaralı reaktörde elde edilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9. 200 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları



Şekil 3.10. 200 rpm karıştırma hızında reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları

200 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilen çalışmalarda reaktörlerde üretilen biyogazın metan içeriğine bakıldığında en yüksek metan oranının %68,4 ile R5(200) numaralı reaktörde elde edildiği görülmektedir. En yüksek metan verimi ve en yüksek biyogaz üretim verimi de yine R5(200) numaralı reaktörde sırasıyla 266,77 mlCH₄/gTUKM ve 402,010 ml/gTUKM değerleri ile elde edilmiştir. R1(200) kontrol reaktörü ile kıyaslandığında R5(200) numaralı reaktörün metan veriminin %23 daha fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3.10).

Tablo 3.11. Reaktörlerin biyogaz üretim verimi ve metan verimleri

Reaktörler	Toplam Biyogaz Üretimi (ml)	Biyogaz Üretim Verimi (ml biyogaz/gTUKM)	Metan İçeriği (%)	Metan verimi (ml/gTUKM)
R1(200)	2840,4	387,36	53,2	206,08
R3(200)	1742,3	271,59	46,2	125,47
R4(200)	2318,3	293,11	42,0	123,11
R5(200)	3327,9	402,10	68,4	266,77
R6(200)	3982,2	271,73	66,1	179,62

30 günlük bekletme süresi sonunda reaktörlerin KOİ giderim verimleri belirlenmiştir. KOİ giderim verimleri incelendiğinde reaktörlerin KOİ giderim verimleri 20,3-34,1 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi %34,1 ile en yüksek R5 numaralı reaktörde tespit edilmiştir (Tablo 3.11).

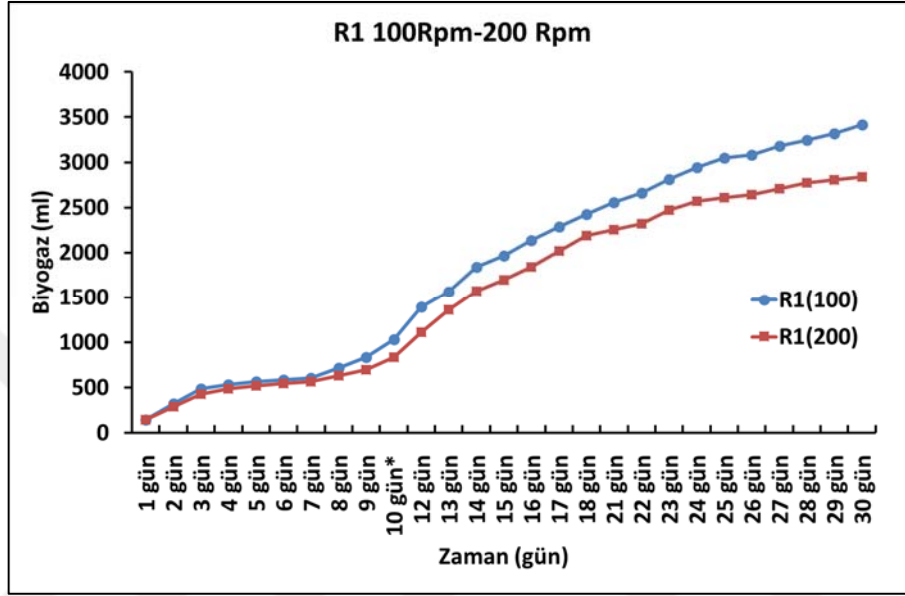
Tablo 3.12. Giderilen KOİ miktarına karşılık üretilen biyogaz miktarı

Reaktörler	KOİgiderilen (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)
R1(200)	12.700	28,3
R3(200)	49.300	23,4
R4(200)	45.500	20,3
R5(200)	97.000	34,1
R6(200)	26.400	29,5

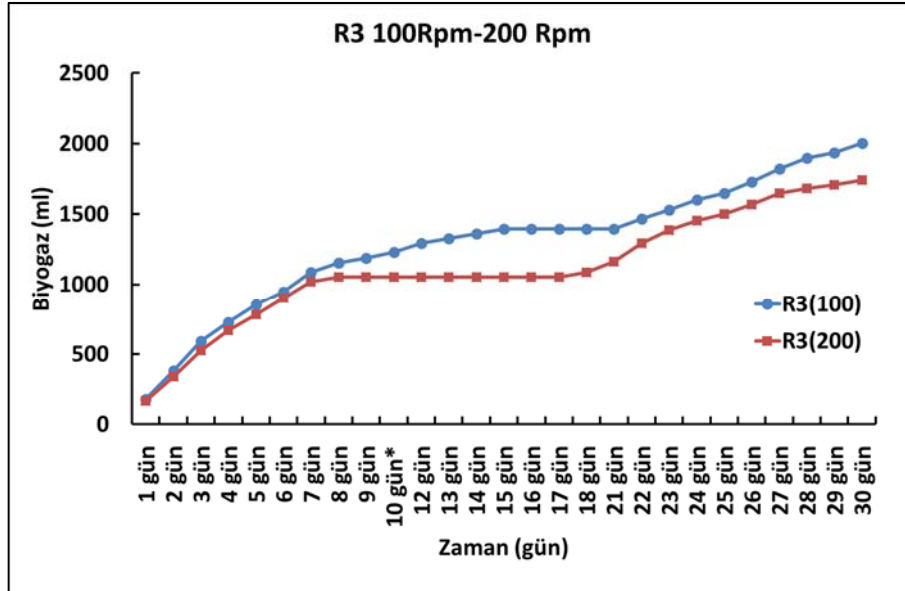
3.1.2.3. Karıştırma hızlarının kofermantasyon ile biyogaz üretimine etkisinin karşılaştırılması

Bölüm 1.2.8'de belirtildiği gibi anaerobik proseslerde karıştırma işleminin büyük önemi bulunmaktadır. Karıştırma işlemi mikroorganizma ile substratın buluşmasına yardımcı olurken diğer yandan hem reaktör içerisindeki sıcaklık dağılımının homojen

olmasına yardımcı olur hem de reaktör içerisindeki maddelerin katılarak tabakalaşmasını önler. Reaktör içerisindeki karıştırma işlemi kadar karıştırma işleminin hızı da önemli bir parametredir. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında 100 ve 200 rpm karıştırma hızlarında çalıştırılan reaktörler mezofilik şartlar (38 °C) altında denenmiştir.

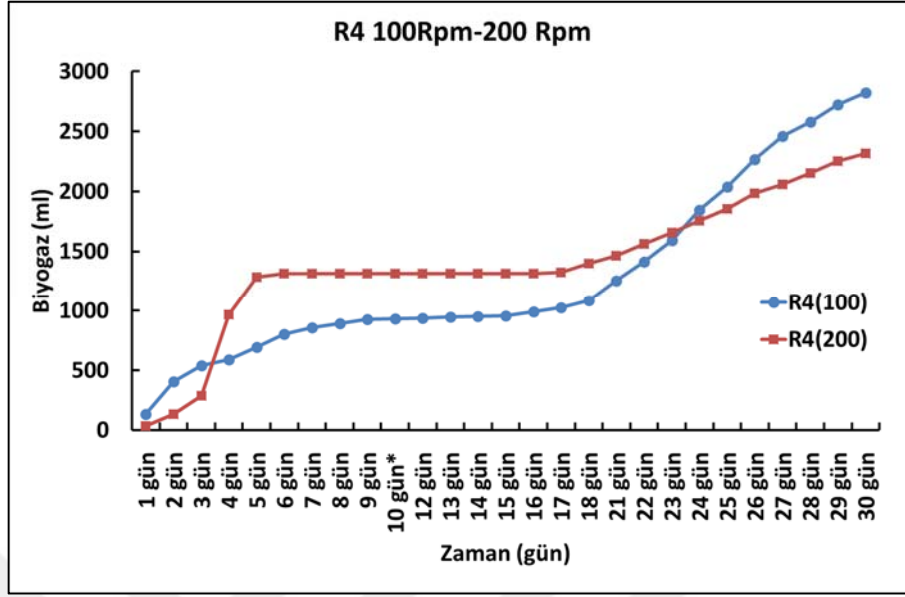


a)

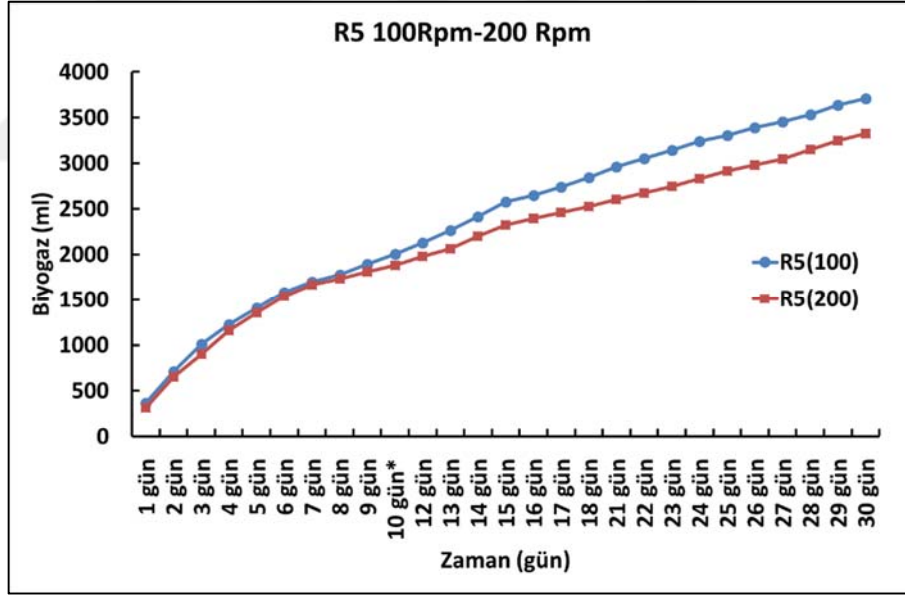


b)

Şekil 3.11. Bütün reaktörlerin 100-200 rpm kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, b) R3 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, c) R4 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, d) R5 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, e) 100 rpm -200 rpm karşılaştırma

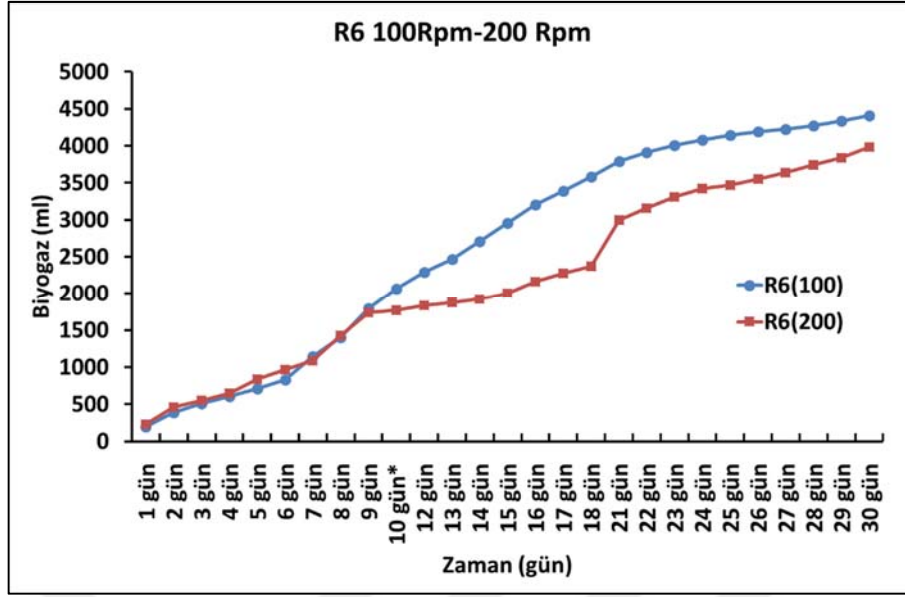


c)



d)

Şekil 3.11. (Devam) Bütün reaktörlerin 100-200 rpm kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, b) R3 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, c) R4 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, d) R5 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, e) 100 rpm -200 rpm karşılaştırma

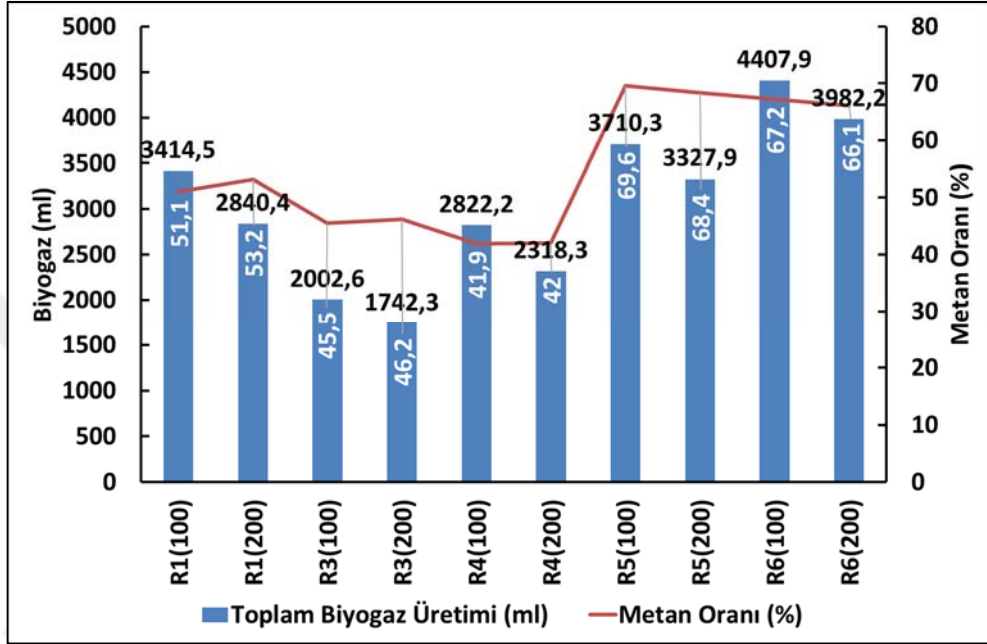


e)

Şekil 3.11. (Devam) Bütün reaktörlerin 100-200 rpm kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, b) R3 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, c) R4 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, d) R5 100 rpm -200 rpm karşılaştırma, e) 100 rpm -200 rpm karşılaştırma

Reaktörlerin günlük biyogaz üretim miktarları karşılaştırıldığında bütün reaktörlerde 100 rpm karıştırma hızında daha fazla biyogaz üretildiği görülmektedir (Şekil 3.11). Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları arasındaki farka bakıldığında ise 100 rpm karıştırma hızında elde edilen toplam biyogaz üretim miktarlarının 200 rpm karıştırma hızında elde edilen toplam biyogaz üretim miktarlarına göre %10- 18 arasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Lettinga [72] farklı mikroorganizma gruplarının uzamsal ilişkiler kurabilmesi için reaktör içerisindeki karışımın karıştırılmasının önemli olduğunu vurgulamıştır. Rivard ve ark. [73] anaerobik reaktörde karıştırma hızının 1- 25 rpm aralığında değiştirildiğinde biyogaz üretiminde çok fazla bir değişim olmadığını belirtmişlerdir. Stroot ve ark. [74] yüksek yükleme oranlarında karıştırma işleminin biyogaz üretim performansını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Whitmore [75] ve ark. anaerobik reaktörde hızlı karıştırma işleminin, reaktör içerisinde bulunan mikroorganizma topluluklarının oluşturduğu flokların bozulmasına ve reaktör içerisindeki mikroorganizmaların sintrofik ilişkisinin bozulmasına neden olduğunu öne sürmüştür. Literatürde belirtildiği gibi gerçekleştirilen çalışmada da yüksek hızda karıştırma işleminin anaerobik kofermantasyon prosesinde biyogaz üretimini düşürdüğü görülmektedir.

Reaktörlerde karıştırma işleminin metan içeriğine etkisine bakıldığında ise Stroot ve ark. [74] karıştırma işleminin yapılmadığı reaktörlerde daha yüksek metan oranına sahip biyogaz üretilbileceğini belirtmişlerdir. Ancak gerçekleştirdiğimiz çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde karıştırma hızının üretilen biyogazın metan oranını çok fazla etkilemediği görülmektedir (Şekil 3.12).



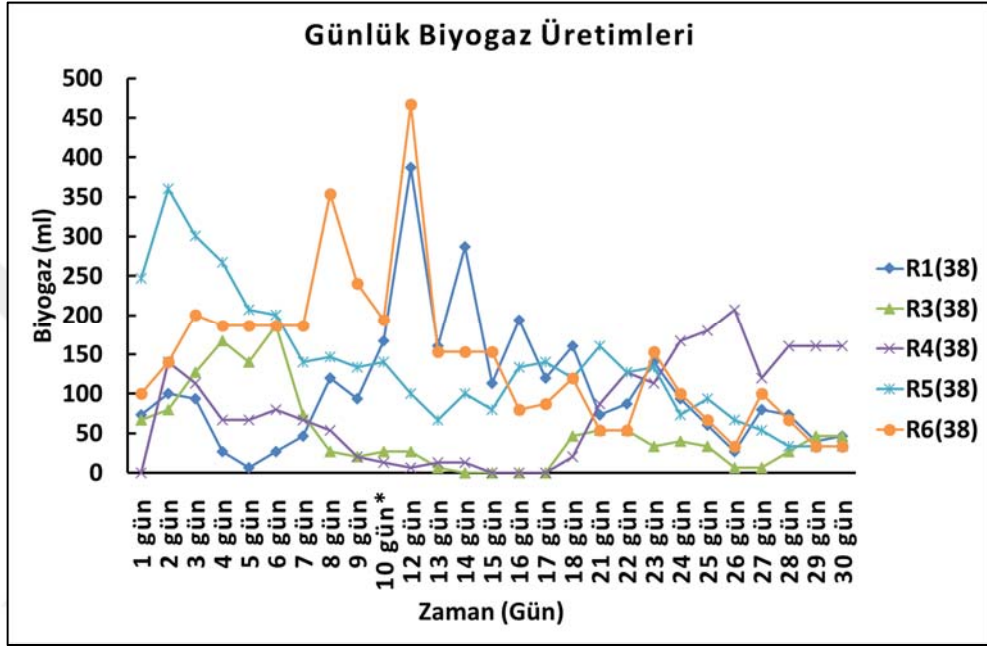
Şekil 3.12. Reaktörlerin toplam üretim miktarları ve metan oranları

3.1.3. Sıcaklık denemeleri

Çalışmanın bu aşamasında sıcaklığın kofermantasyon üzerine etkisini belirlemek amacıyla R1, R3, R4, R5 ve R6 numaralı reaktörler mezofilik (38 °C) ve termofilik (50 °C) şartlar altında kesikli olarak beslenerek çalıştırılmıştır. Farklı sıcaklıkların denendiği bu çalışmada R(38) mezofilik (38 °C) sıcaklıkta çalıştırılan reaktörler ve R(50) ise termofilik (50 °C) sıcaklıkta çalıştırılan reaktör olarak tanımlanmıştır. Çalışmalarda gerekli olan ısının sağlanabilmesi için su banyosu kullanılmıştır (Şekil 2.1). Reaktörlerin karıştırılması işlemi günde bir kere manuel olarak gerçekleştirilmiştir.

3.1.3.1. 38 °C’de yapılan çalışmalar

Bu çalışmada R1(38), R3(38), R4(38), R5(38) ve R6(38) numaralı reaktörler çalıştırılmıştır. Reaktörler 38 °C sıcaklıkta 30 günlük bekletme süresince denenmişlerdir. Reaktörler günde bir kere manuel olarak karıştırılmışlardır. Şekil 3.13’de 38 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları verilmiştir.



Şekil 3.123. 38 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları

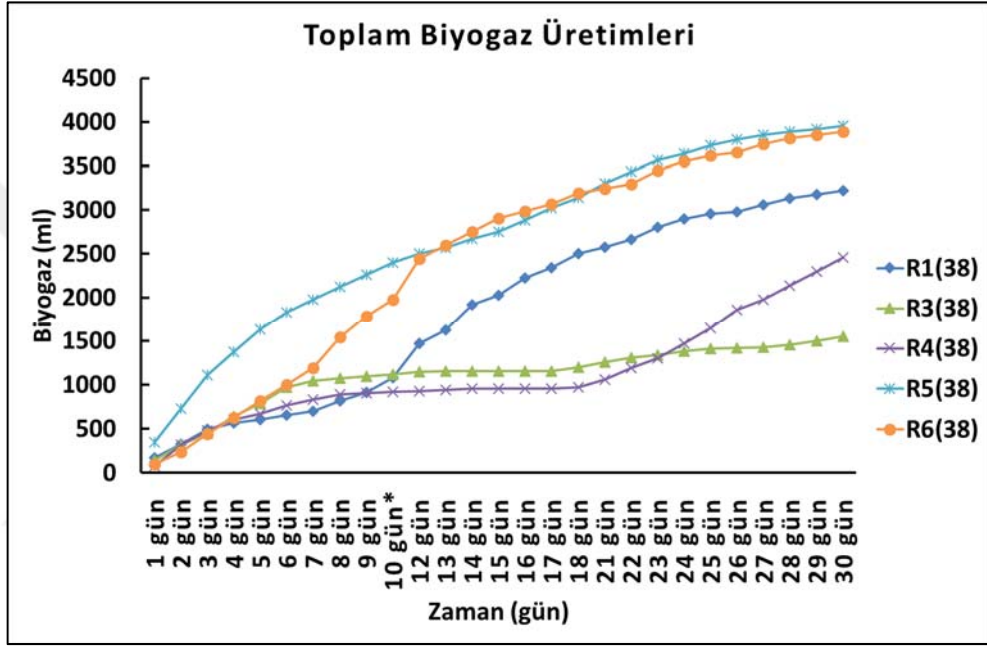
Reaktörlerde karıştırma hızının denendiği çalışmada olduğu gibi 10. günde 1 N NaOH kullanılarak pH düzeltilmesi yapılmıştır. Reaktörlerin başlangıçtaki ve 10. Gündeki pH değerleri Tablo 3.12’de verilmiştir.

Tablo 3.13. Reaktörlerin pH değerleri

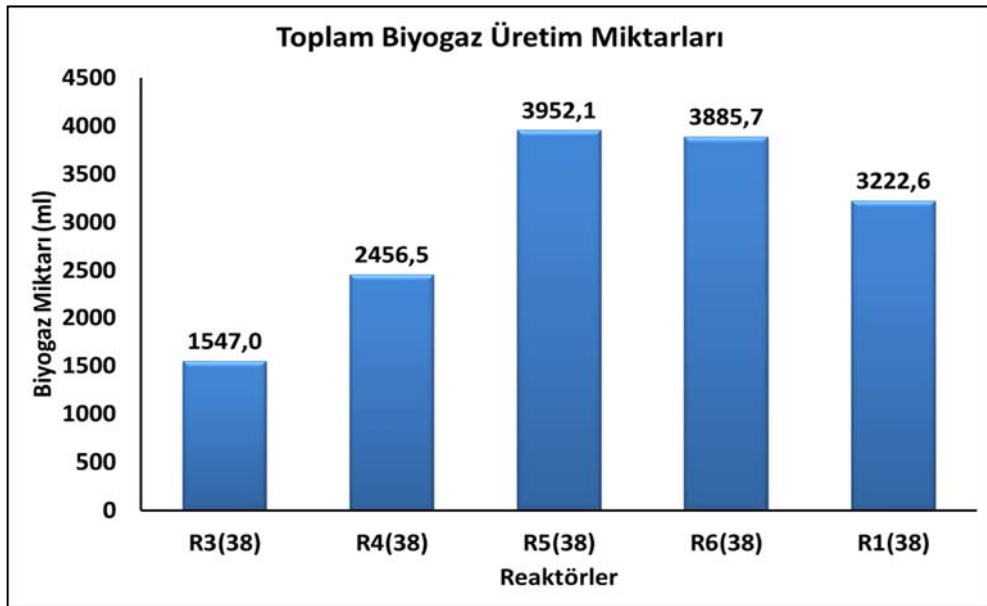
Reaktör	Başlangıç pH değeri	10. gün pH değeri
R1(38)	7,01	6,14
R3(38)	6,47	4,51
R4(38)	6,81	4,24
R5(38)	7,08	5,83
R6(38)	7,5	6,09

pH düzeltilmesinden sonra R3(38) ve R4(38) numaralı reaktörlerde 17. güne kadar kayda değer bir biyogaz üretimi gerçekleşmezken R1(38) ve R6(38) numaralı reaktörlerde 2 gün sonra en fazla biyogaz üretiminin gerçekleştiği görülmüştür. 17

günden sonra R4(38) numaralı reaktör dışında diğer tüm reaktörlerde biyogaz üretiminin düştüğü görülmektedir. R4(38) numaralı reaktörde ise 17-27 günler arasında en yüksek biyogaz üretimi görülmüştür (Şekil 3.13). Çalışmanın başından sonuna kadar biyogaz üretimi en kararlı reaktör R5(38) ve R6(38) olarak gözlenmiştir (Şekil 3.14). 30 günlük bekletme süresi sonunda en yüksek biyogaz üretim miktarı 3952,1 ml ile R5(38)'de en düşük biyogaz üretim miktarı ise 1547 ml ile R3(38)' de elde edilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.14. 38 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları



Şekil 3.15. 38 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları

38 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmalarda reaktörlerde üretilen biyogazın içeriğine bakıldığında en yüksek metan oranına %72,3 ile R5(38) numaralı reaktörde ulaşılmıştır. R6(38) numaralı reaktör ise %66,8 metan içeriği ile en yüksek metan oranına sahip ikinci reaktör olmuştur. Reaktörlerin biyogaz üretim verimleri ve metan verimleri incelendiğinde en yüksek biyogaz üretim verimi 487,84 ml/gTUKM ve en yüksek metan verimi 352,71 mlCH₄/gTUKM ile yine R5(38) numaralı reaktörde elde edilmiştir. Biyogaz üretim verimi ve metan veriminde ikinci sırayı R1(38) numaralı reaktör almıştır (Tablo 3.13).

Tablo 3.14. Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği

Reaktörler	Biyogaz Üretimi (ml)	Biyogaz Üretim Verimi (ml biyogaz/gTUKM)	Metan İçeriği (%)	Metan verimi (ml/gTUKM)
R1(38)	3222,6	345,31	52,8	182,33
R3(38)	1547	222,99	47,2	105,25
R4(38)	2456,5	294,36	45,7	134,52
R5(38)	3952,1	487,84	72,3	352,71
R6(38)	3885,7	264,90	66,8	176,95

Reaktörlerin KOİ giderim verimleri incelendiğinde, KOİ giderim verimleri, %23,1-37,2 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimine %37,2 ile R5(38)'de ulaşılmıştır (Tablo 3.14).

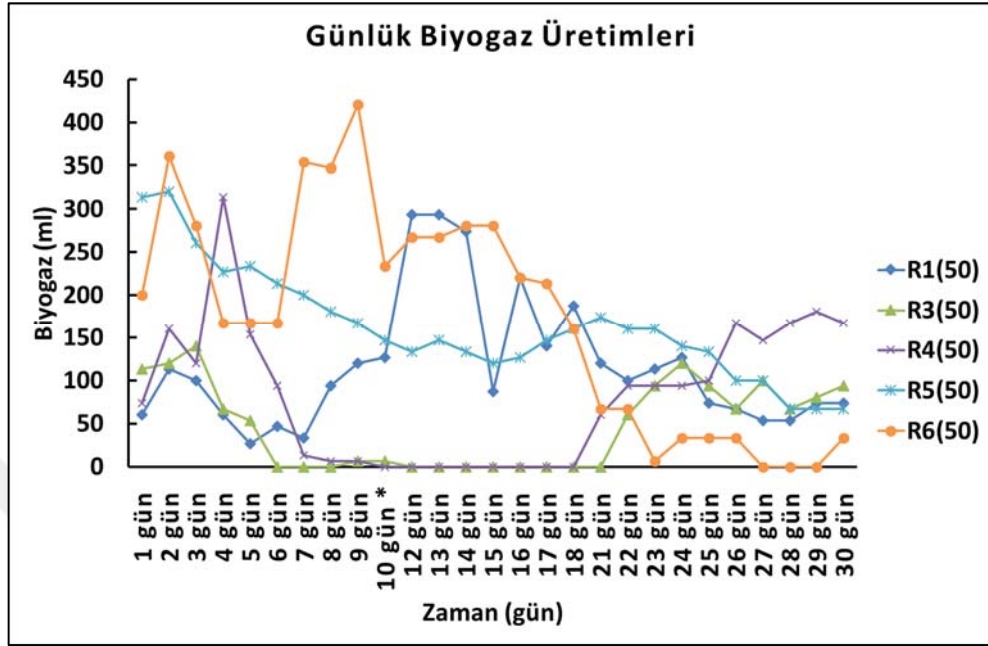
Tablo 3.15. Reaktörlerin KOİ giderim verimleri

Reaktörler	KOİ giderilen (mg/L)	KOİ Giderim Verimi (%)
R1(38)	12.700	27,9
R3(38)	69.400	30,5
R4(38)	57.600	23,1
R5(38)	107.000	37,2
R6(38)	30.500	32,9

3.1.3.2. 50 °C'de yapılan çalışmalar

Bu çalışmada R1(50), R3(50), R4(50), R5(50) ve R6(50) numaralı reaktörler çalıştırılmıştır. Reaktörler 50 °C sıcaklıkta 30 günlük bekletme süresince denenmişlerdir. Reaktörler günde bir kere manuel olarak karıştırılmışlardır. Şekil

3.16’da 50 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları verilmiştir. Reaktörlerin başlangıçtaki ve 10. Gündeki pH değerleri Tablo 3.15’de verilmiştir.

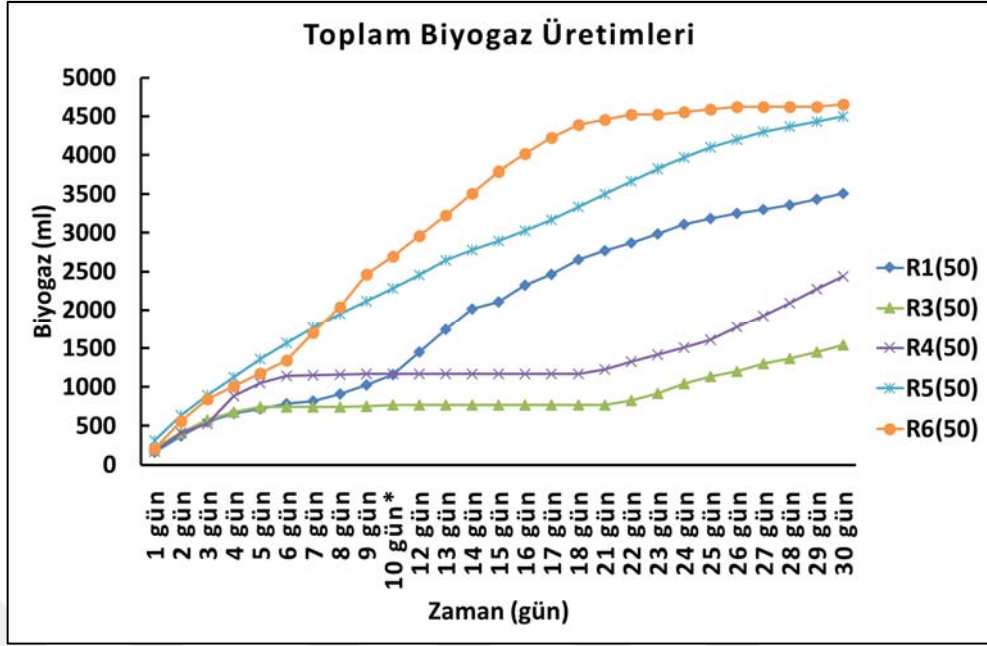


Şekil 3.16. 50 °C sıcaklıkta günlük biyogaz üretim miktarları

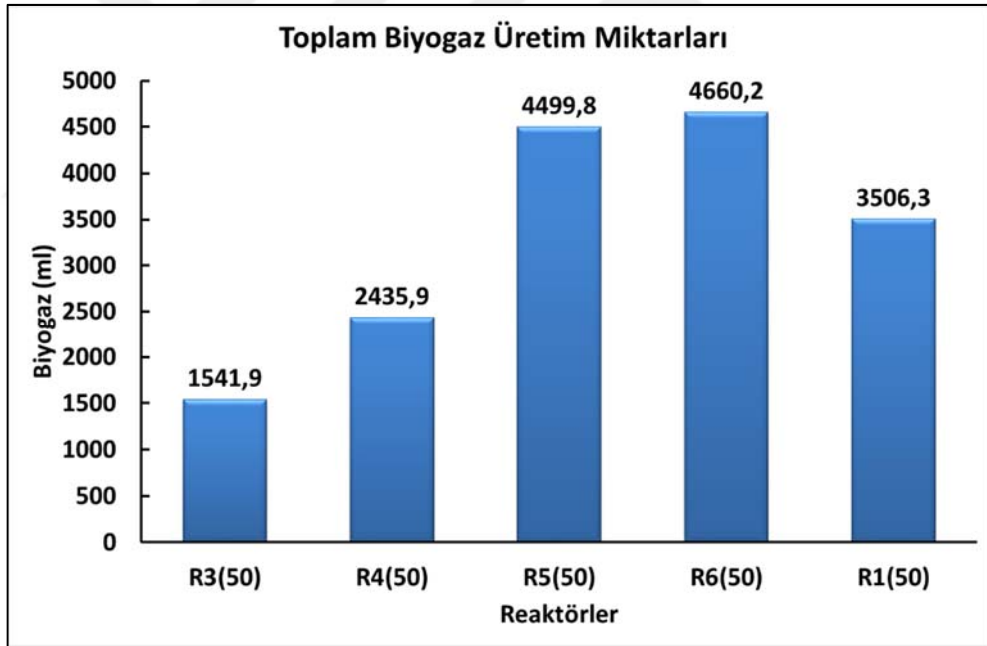
Tablo 3.16. Reaktörlerin pH değerleri

Reaktör	Başlangıç pH değeri	10. gün pH değeri
R1(50)	6,76	5,94
R3(50)	6,5	4,48
R4(50)	6,85	4,32
R5(50)	7,11	5,54
R6(50)	7,43	6,13

Reaktörlerde pH düzeltilmesi öncesi 6. Günden sonra R3 ve R4 numaralı reaktörlerde biyogaz üretimi tamamen durmuştur. Diğer reaktörlerin biyogaz üretimlerinde çok fazla değişim gözlenmemiştir. pH düzeltilmesi sonrasında R3 ve R4 numaralı reaktörlerde 18. günden sonra biyogaz üretimi gözlenmiş olup 25. günden sonra R4 numaralı reaktörün günlük biyogaz üretim miktarı oldukça artmıştır (Şekil 3.16). 50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmada R1(50), R5(50) ve R6(50) numaralı reaktörlerde dengeli bir biyogaz üretimi gözlenmiştir. Bu durumun reaktör içerisindeki pH dengesinin çok fazla bozulmamasından kaynaklandığı söylenebilir. 30 günlük bekleme süresi sonrasında en yüksek biyogaz üretim miktarı 4660,2 ml ile R6(50) numaralı reaktörde elde edilmiştir. En düşük biyogaz üretim miktarı ise 1541,9 ml ile R3(50) numaralı reaktörde elde edilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.137. 50 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları



Şekil 3.18. 50 °C sıcaklıkta reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları

50 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen çalışmalarda reaktörlerde üretilen biyogazın içeriğine bakıldığında en yüksek metan oranı %75,6 ile R5(50) numaralı reaktörde ulaşılmıştır. R6(50) numaralı reaktör ise %69,5 metan içeriği ile en yüksek metan oranına sahip ikinci reaktör olmuştur. Reaktörlerin biyogaz üretim verimleri ve metan verimleri incelendiğinde en yüksek biyogaz üretim verimi 526,92 ml/gTUKM ve en yüksek metan verimi 398,35 mlCH₄/gTUKM ile yine R5(50) numaralı reaktörde elde

edilmiştir. Biyogaz üretim verimi ve metan veriminde ikinci sırayı R1(50) numaralı reaktör alırken, R6(50) numaralı reaktörde 217,08 mlCH₄/gTUKM metan verimi ile R1(50) numaralı reaktöre oldukça yakın bir verim elde edilmiştir (Tablo 3.16).

Tablo 3.17. Reaktörlerin biyogaz üretim miktarları ve üretilen biyogazın metan içeriği

Reaktörler	Biyogaz Üretimi (ml)	Biyogaz Üretim Verimi (ml biyogaz/gTUKM)	Metan İçeriği (%)	Metan verimi (ml/gTUKM)
R1(50)	3506,3	422,03	51,6	217,77
R3(50)	1541,9	208,29	46,3	96,44
R4(50)	2435,9	317,96	42,3	134,50
R5(50)	4499,8	526,92	75,6	398,35
R6(50)	4660,2	312,35	69,5	217,08

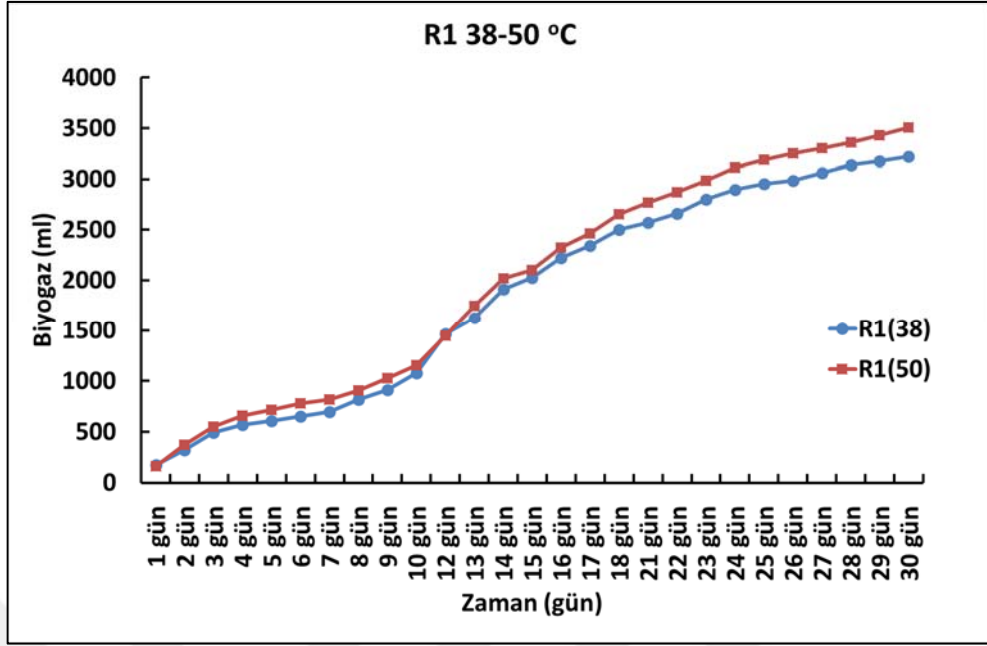
Reaktörlerin KOİ giderim verimleri incelendiğinde, KOİ giderim verimleri, %21,5-39,6 aralığında tespit edilmiştir. En yüksek KOİ giderim verimine %39,6 ile R5(50)'de ulaşılmıştır (Tablo 3.17).

Tablo 3.18. Reaktörlerin KOİ giderim verimleri

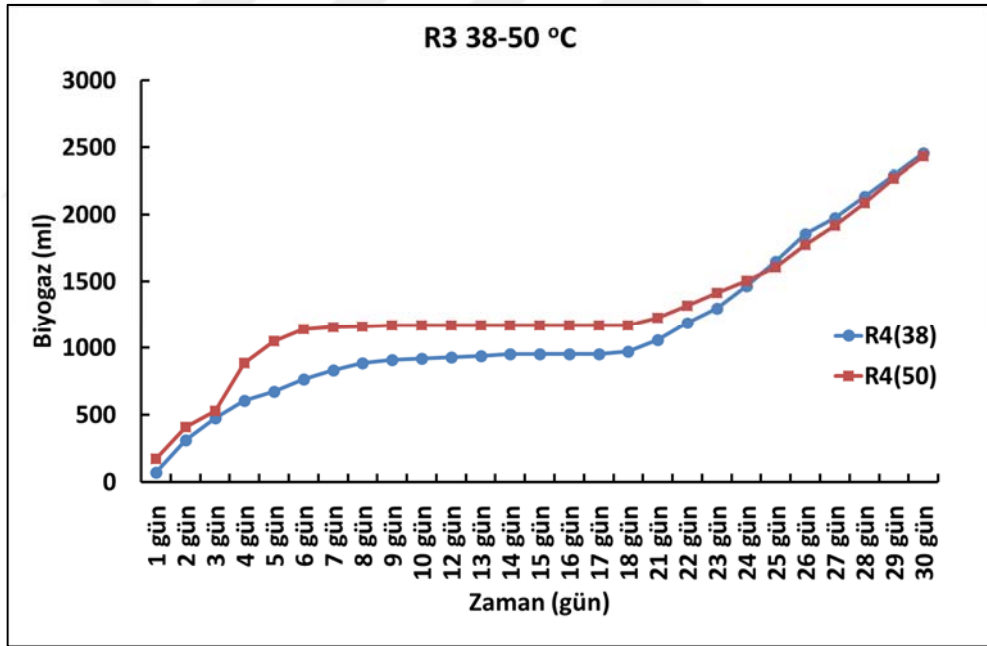
Reaktörler	KOİgiderilen (mg/L)	Giderim Verimi (%)
R1(50)	12.000	26,8
R3(50)	51.700	25,6
R4(50)	50.200	21,5
R5(50)	116.600	39,6
R6(50)	36.300	37,2

3.1.3.3. Sıcaklığın kofermantasyon ile biyogaz üretimine etkisinin karşılaştırılması

Sıcaklık, anaerobik parçalanma sistemlerinin en temel parametrelerinden bir tanesidir. Anaerobik proseste birden fazla mikroorganizma grubu birlikte çalıştığı için ortam şartları, bütün mikroorganizma gruplarının çalışabileceği şekilde ayarlanmalıdır. Çalışmanın bu kısmında reaktörler mezofilik (38 °C) ve termofilik (50 °C) şartlar altında çalıştırılarak sıcaklığın kofermantasyon ile biyogaz üretimi üzerine etkileri araştırılmıştır.

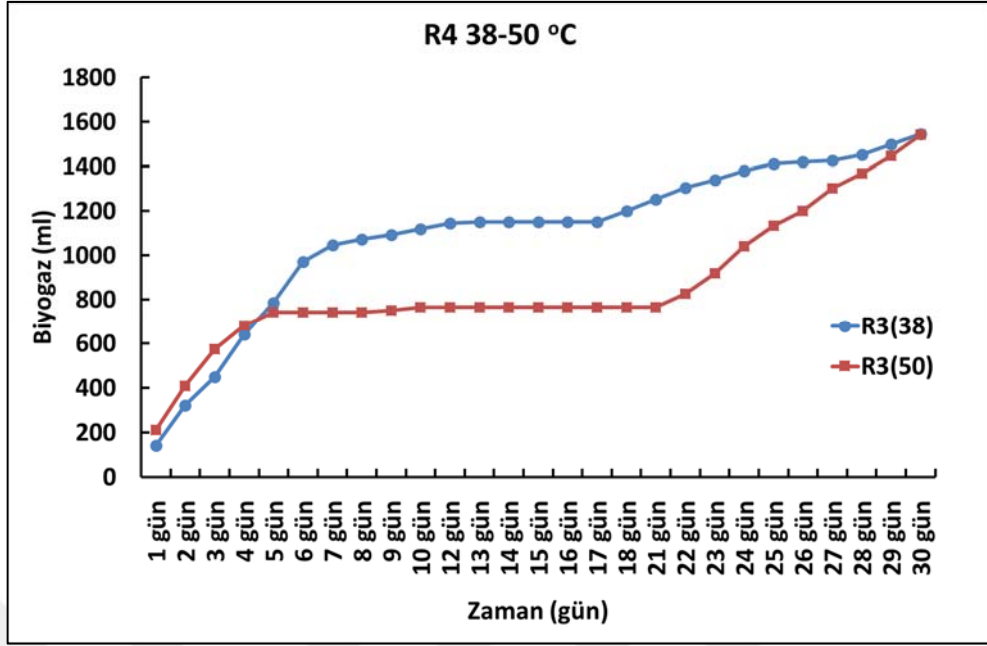


a)

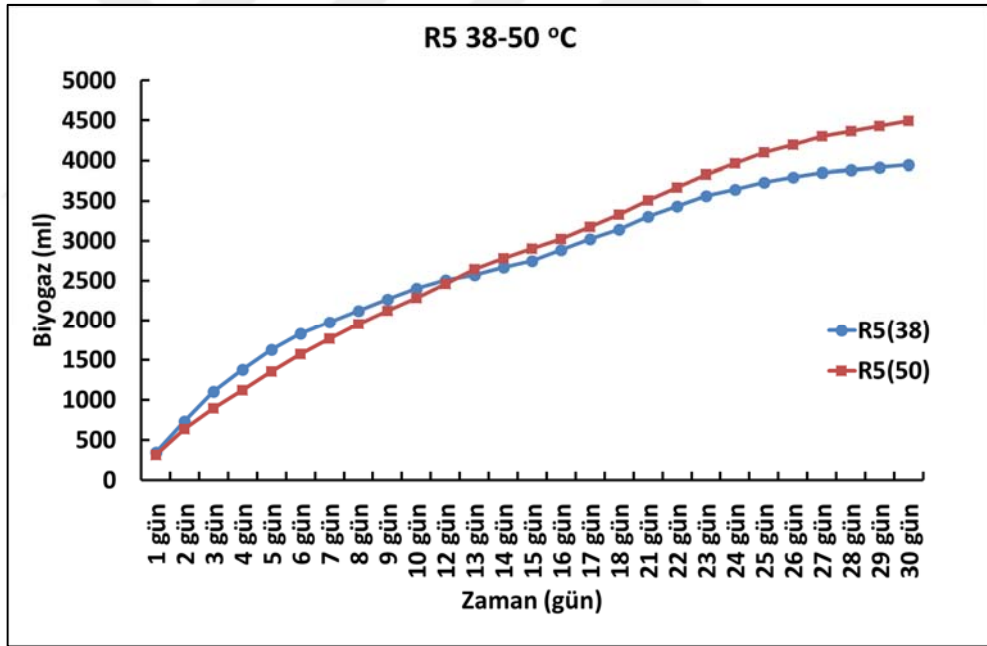


b)

Şekil 3.19. Bütün reaktörlerin 38-50 °C sıcaklıklardaki kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 38-50 °C, b) R3 38-50 °C, c) R4 38-50 °C, d) R5 38-50 °C, e) R6 38-50 °C

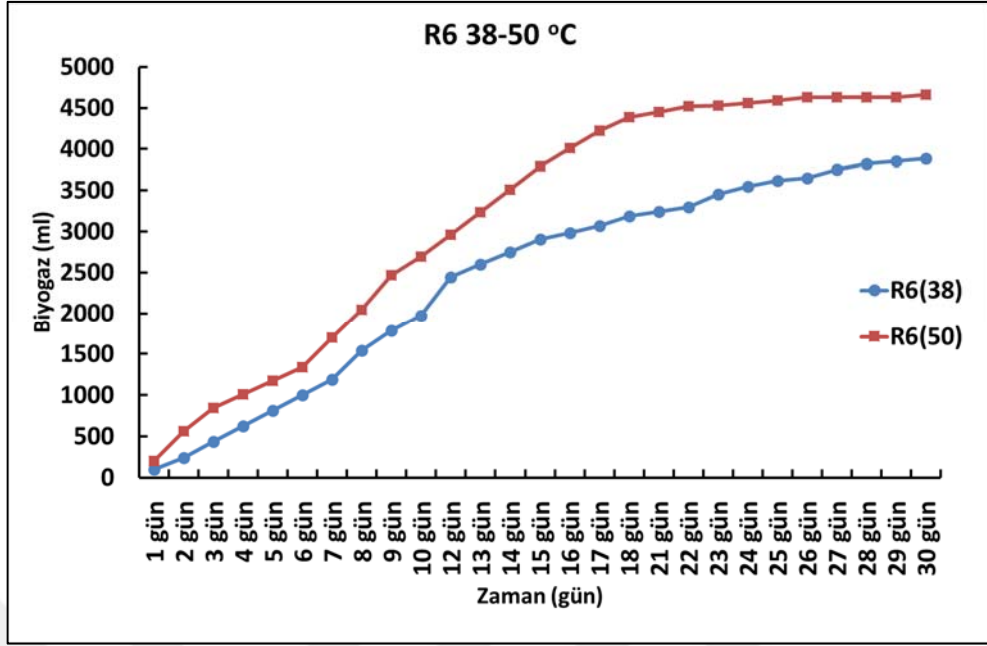


c)



d)

Şekil 3.19. (Devam) Bütün reaktörlerin 38-50 °C sıcaklıklardaki kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 38-50 °C, b) R3 38-50 °C, c) R4 38-50 °C, d) R5 38-50 °C, e) R6 38-50 °C



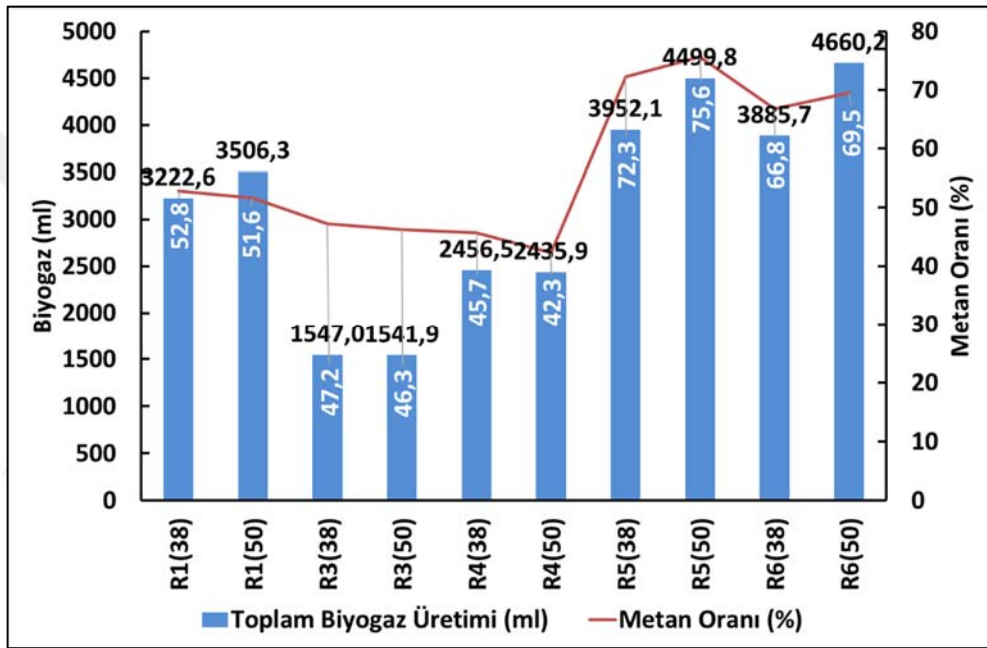
e)

Şekil 3.19. (Devam) Bütün reaktörlerin 38-50 °C sıcaklıklardaki kümülatif gaz üretim miktarları a) R1 38-50 °C, b) R3 38-50 °C, c) R4 38-50 °C, d) R5 38-50 °C, e) R6 38-50 °C

Reaktörlerin kümülatif biyogaz üretim miktarları karşılaştırıldığında R3 ve R4 numaralı reaktörler dışındaki diğer tüm reaktörlerde 50 °C sıcaklıkta daha fazla biyogaz üretimi gözlenmiştir. R3 ve R4 numaralı reaktörlerde ise 38 °C ve 50 °C sıcaklıklarda birbirine çok yakın biyogaz üretimleri gözlenmiştir. Reaktörlerin toplam biyogaz üretim miktarları arasındaki farka bakıldığında R1, R5 ve R6 numaralı reaktörlerde 50 °C sıcaklıkta %8-17 daha fazla biyogaz üretildiği, R3 ve R4 numaralı reaktörlerde ise 38 °C sıcaklıkta %3-8 daha fazla biyogaz üretildiği görülmektedir. Chen ve ark. [76] büyükbaş hayvan gübresi kullanarak yaptıkları çalışmada termofilik sıcaklıklarda gerçekleştirilen fermantasyon işleminin mezofilik sıcaklıklarda gerçekleştirilen fermantasyon işlemine göre kinetik olarak daha avantajlı olduğunu belirtmişler ve Mackie ve Braynt [77] termofilik sıcaklıklarda mezofilik sıcaklıklardakine göre daha fazla biyogaz üretilbileceğini belirtmişlerdir.

Sıcaklığın, üretilen biyogazın metan oranına etkisine bakıldığında ise R5 ve R6 numaralı reaktörlerde termofilik sıcaklıklarda daha yüksek metan oranı gözlenirken R1, R3 ve R4 numaralı reaktörlerde mezofilik ve termofilik sıcaklıklarda birbirine oldukça yakın metan oranları elde edilmiştir. R5 numaralı reaktörde termofilik sıcaklıklarda elde edilen %75,6 metan oranı, gerçekleştirilen denemelerde elde edilen

en yüksek metan oranıdır. Zinder ve ark. [78] ise sıcaklık ile metan üretimi yapan mikroorganizma kültürleri arasında önemli bir ilişki olduğunu ve sıcaklık şartlarına bağlı olarak metan üretimi yapan bakteri kültürlerinin değiştiğini belirtmiştir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada metan üretiminde etkili olan mikroorganizma gruplarını inceleme imkânı olmamıştır. Ancak literatürden elde edilen bilgiler ışığında termofilik sıcaklık şartlarında R5 numaralı reaktörde en yüksek metan oranına sahip biyogazın elde edilmesi, farklı mikroorganizma gruplarının termofilik sıcaklıklardaki faaliyetlerine bağlanmaktadır.

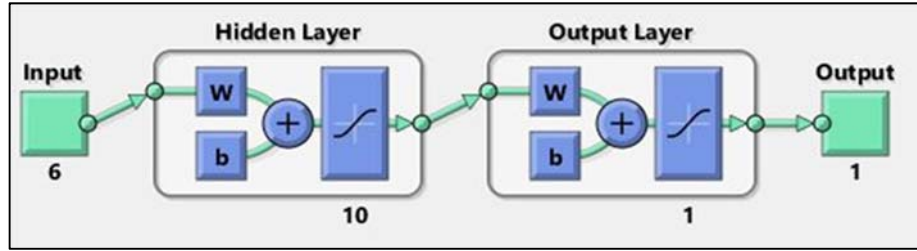


Şekil 3.20. Reaktörlerin toplam üretim miktarları ve metan oranları

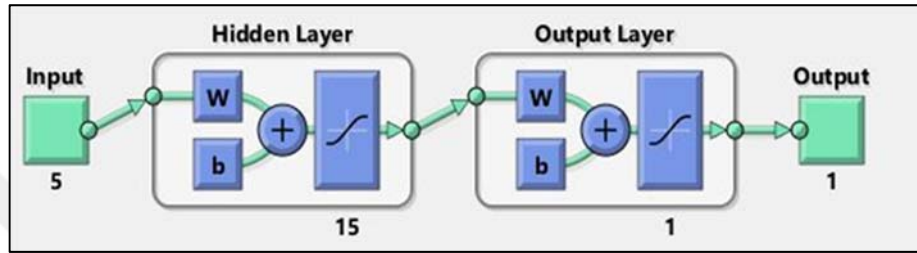
3.1.4. Yapay sinir ağı analizleri

Çalışmanın bu aşamasında deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak Matlab 8.4 programının YSA aracı kullanılarak iki farklı model geliştirilmiştir. Geliştirilen birinci modelde reaktörlerden elde edilebilecek olan toplam biyogaz üretim miktarları tahmin edilebilirken, ikinci modelde metan oranları tahmin edilebilmektedir. Bu amaçla deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler programa işlenerek programın eğitilmesi sağlanmıştır. Programı eğitebilmek amacıyla, büyükbaş gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu oranları, zaman, sıcaklık ve karıştırma hızı veri girdisi olarak, günlük biyogaz üretim miktarları ve metan oranları ise veri çıktısı olarak programa işlenmiştir. Biyogaz miktarı ve metan oranlarını tahmin edebilecek iki ayrı

model geliştirildiği için program veri çıktılarına göre iki farklı şekilde eğitilmiştir. İki farklı şekilde eğitilen YSA'nın mimari yapısı Şekil 3.21'de verilmiştir.



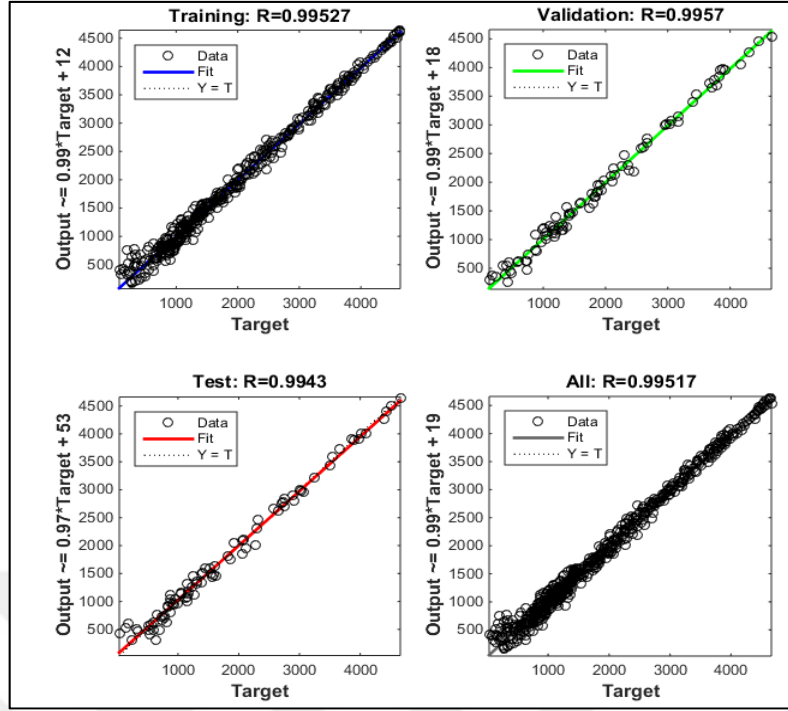
a)



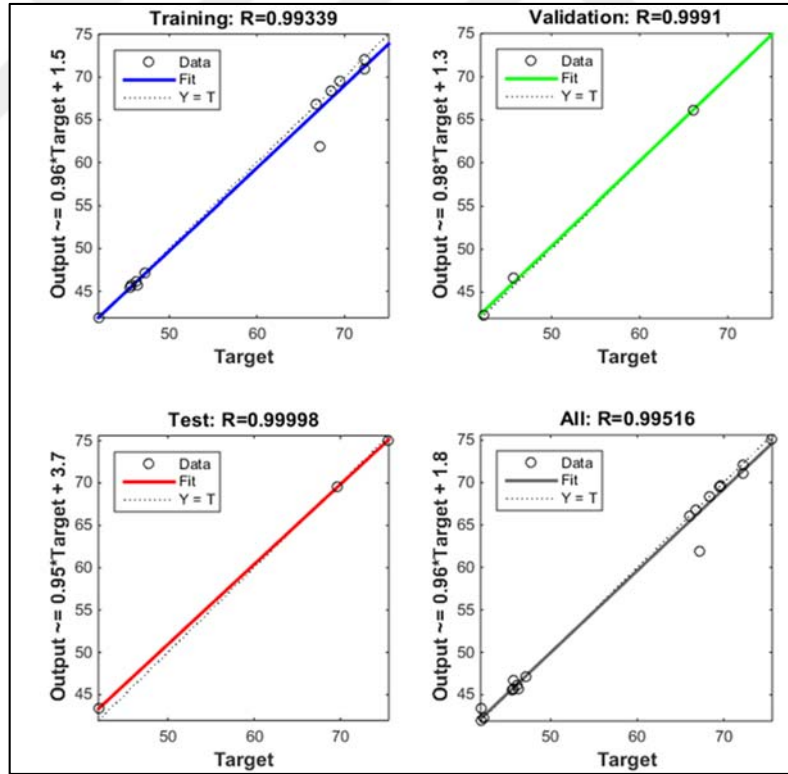
b)

Şekil 3.21. Çalışmada kullanılan YSA'nın mimari yapısı a) Biyogaz miktarı analizi b) Metan oranı analizi

Biyogaz miktarı analizi için geliştirilen çok katmanlı ileri beslemeli model, 6 adet giriş verisi, 1 adet çıkış verisi ve 10 sinapstan oluşmaktadır. Metan oranı için geliştirilen çok katmanlı ileri beslemeli model ise 5 adet giriş verisi, 1 adet çıkış verisi ve 15 sinapstan oluşmaktadır. Model oluşturulurken kullanılacak olan sinaps sayısı eğitim sonucunda elde edilen validasyon eğrisinin R değerinin 1'e olan yakınlığına göre değiştirilerek belirlenmiştir. Oluşturulan modellerde biyogaz üretimi için R değeri 0,99517 iken metan oranı için R değeri 0,99516 olarak elde edilmiştir (Şekil 3.22).



a)

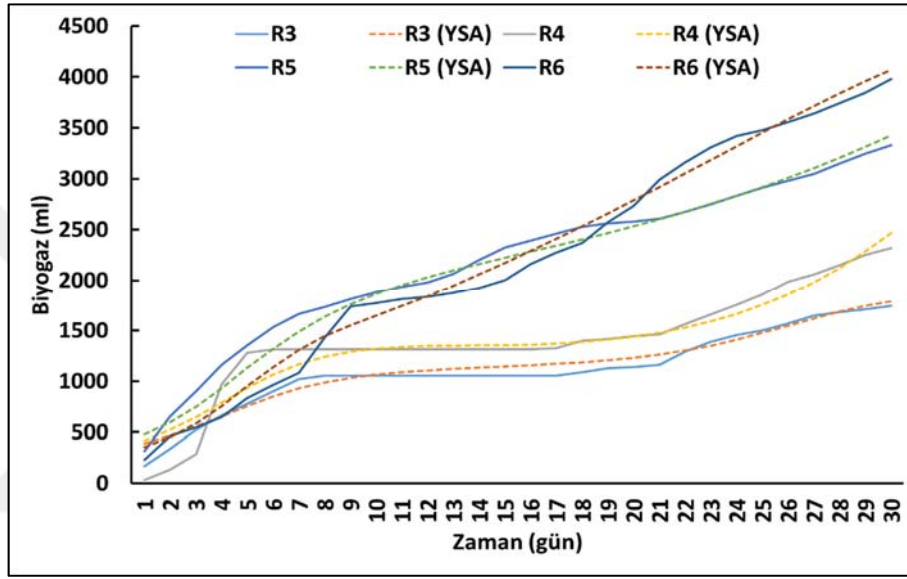


b)

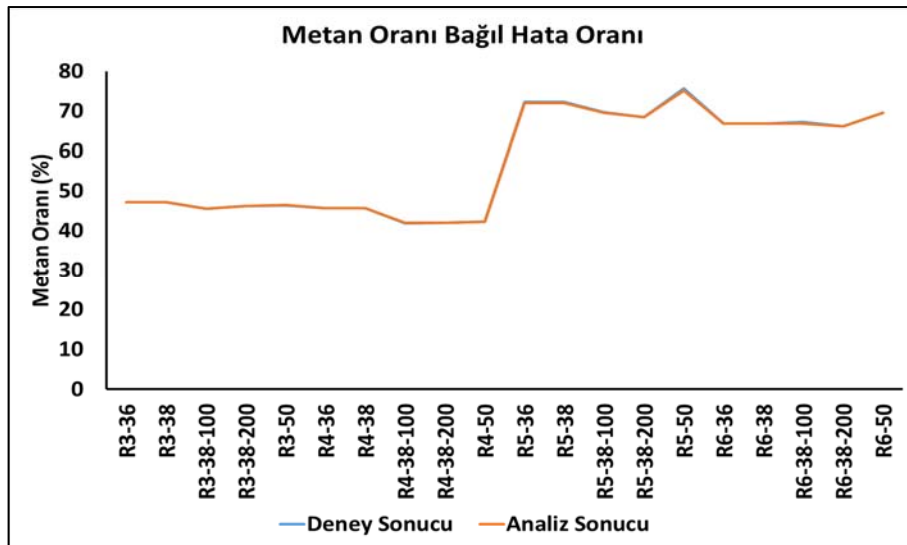
Şekil 3.22. Eğitim sonucunda elde edilen regresyon eğrileri
a) biyogaz miktarı b) metan oranı

Eğitim sonucunda elde edilen regresyon eğrileri incelendiğinde eğitim, test ve doğrulama grafikleri sonuçlarının birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. YSA deneysel sonuçlara göre eğitildikten sonra hata oranını belirlemek amacıyla deneysel veriler ile programdan elde edilen veriler karşılaştırılarak 1 nolu denkleme göre hata oranları belirlenmiştir [79].

$$\text{Bađıl hata} = \left(\frac{\text{Deneyysel sonuçlar} - \text{YSA ile elde edilen sonuçlar}}{\text{Deneyysel sonuçlar}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$



şekil 3.143. 38 °C sıcaklık ve 200 rpm karıştırma hızında elde edilen biyogaz üretim miktarı deneysel sonuçları ile YSA analiz sonuçlarının karşılaştırılması



şekil 3.154. Bütün reaktörlerden deneysel olarak elde edilen metan oranı sonuçları ile YSA analiz sonuçlarının karşılaştırılması

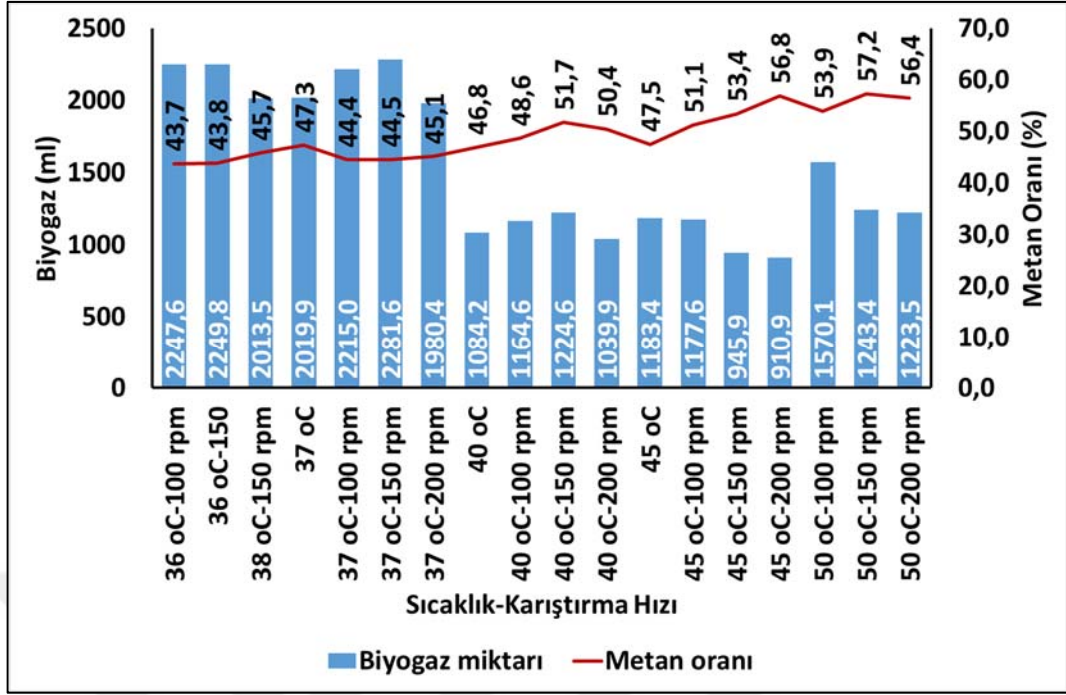
3.1.5. Yapay sinir ağı analiz sonuçları

Çalışmada 4 farklı karışım oranında (Tablo 3.18), 3 farklı sıcaklıkta (36-38-50 °C) ve 2 farklı karıştırma hızında (100 rpm ve 200 rpm) elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Sonuçlara göre eğitilen YSA programında eğitimde kullanılan her bir karıştırma oranı için deneysel olarak çalışılmamış olan 37 °C, 40 °C ve 45 °C sıcaklıklarda ve 100 rpm 150 rpm ve 200 rpm karıştırma hızlarında üretilebilecek biyogaz miktarları ve metan oranları belirlenmiştir. Ayrıca deneysel olarak çalışılmış olan 36 °C, 38 °C ve 50 °C sıcaklıklarda çalışılmamış olan 100 rpm, 150 rpm, 200 rpm karıştırma hızlarındaki biyogaz üretim miktarları ve metan oranları belirlenmiştir. YSA programı ile belirlenen sonuçlar Şekil 3.25-3.28’de verilmiştir.

Tablo 3.19. Analizlerde kullanılan reaktör karışım oranları

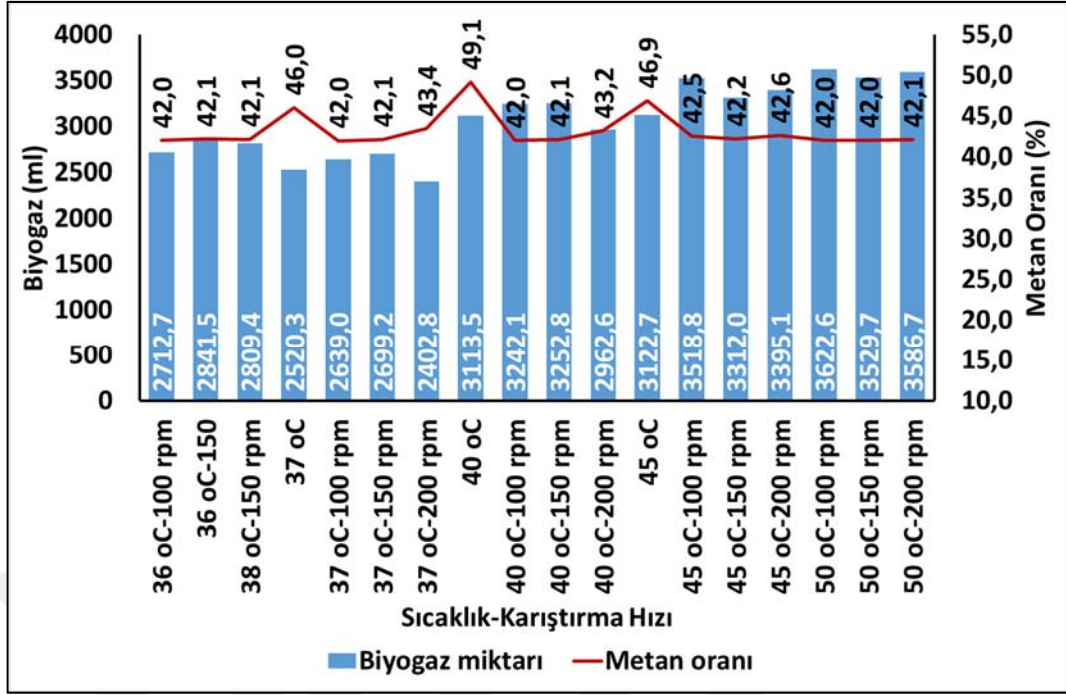
Reaktör	BBG %	TG %	PAS %
R3	50	10	40
R4	50	20	30
R5	50	30	20
R6	50	40	10

R3 numaralı reaktörde yapılan YSA analizi incelendiğinde düşük sıcaklık değerlerinde daha yüksek biyogaz üretim miktarları elde edilebileceği görülmüştür. Analiz sonucunda en yüksek biyogaz üretim miktarı 2281,6 ml ile 37 °C sıcaklık ve 150 rpm karıştırma hızında elde edilmiştir (Şekil 3.25). Sıcaklığın artması ile birlikte biyogaz üretim miktarlarında artış olmadığı görülmektedir. R3 numaralı reaktörde üretilen biyogazın metan oranlarına bakıldığında sıcaklığın artmasına bağlı olarak biyogazın metan içeriğinin arttığı görülmektedir. En yüksek metan oranına %57,23 ile 50 °C sıcaklık ve 150 rpm karıştırma hızında ulaşılmıştır. Ancak 40 °C ve üzeri sıcaklıklarda %50’nin üzerinde metan üretilebileceği görülmektedir.



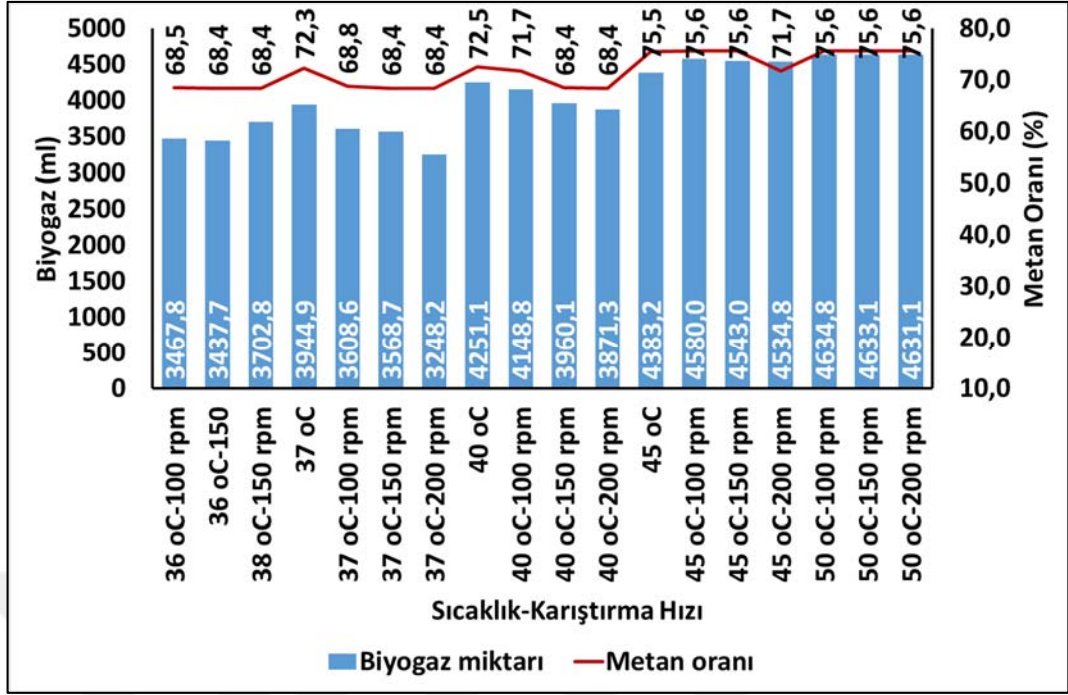
Şekil 3.165. R3 reaktörü YSA sonuçları

R4 reaktörünün YSA analiz sonuçları incelendiğinde sıcaklığın yükselmesi ile birlikte biyogaz üretim miktarlarının artabileceği görülmektedir. Analiz sonucuna göre 40 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda karıştırma hızları karşılaştırıldığında, 100 rpm karıştırma hızında bütün sıcaklıklarda daha fazla biyogaz üretilmektedir. Yapılan YSA analiz sonucuna göre en yüksek biyogaz üretim miktarına 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında ulaşılmıştır (Şekil 3.26). R4 numaralı reaktörün YSA analizi incelendiğinde karıştırmanın yapılmadığı reaktörlerde, metan içeriği daha yüksek biyogaz üretilbileceği görülmektedir. R4 numaralı reaktörde en yüksek metan içeriğine 40 °C sıcaklıkta %49,1 ile ulaşılmıştır.



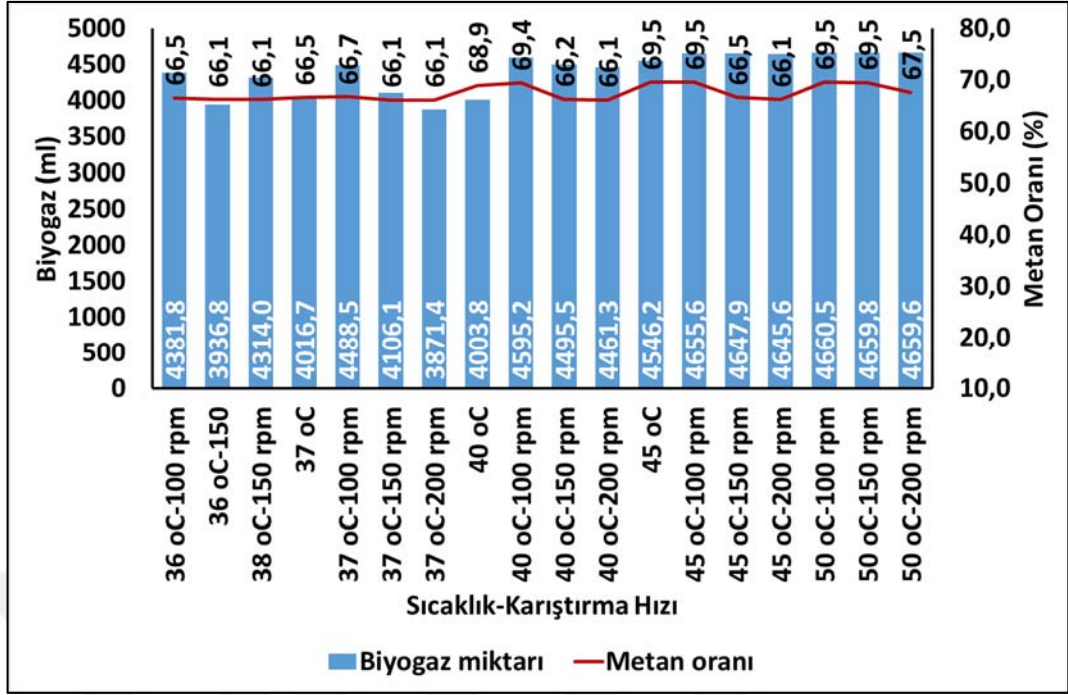
Şekil 3.26. R4 reaktörü YSA sonuçları

R5 numaralı reaktörde gerçekleştirilen YSA analizine göre sıcaklığın 45 °C'nin üzerine çıkmasının üretilen biyogaz miktarını çok fazla etkilemediği görülmektedir. 45 °C'nin üzerinde gerçekleştirilen analizlerde karıştırma hızının da biyogaz üretimini çok fazla etkilemediği söylenebilmektedir. Yapılan analize göre 50 °C ve 100 rpm karıştırma hızında 4634,8 ml biyogaz üretimi gerçekleştirilirken 45 °C ve 100 rpm karıştırma hızında 4580 ml biyogaz üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.27). Deneysel çalışmalarda R5 numaralı reaktörde bütün diğer reaktörlere göre en yüksek metan içeriğine sahip biyogaz üretimi tespit edilmiştir. Ancak bu değere 50 °C sıcaklıkta ulaşılabilmiştir. Yapılan YSA analizi sonucunda 45 °C sıcaklıkta %75 metan içeriğine ulaşılabilirdiği görülmektedir. 45 °C sıcaklıkta karıştırma hızının metan içeriğini çok fazla etkilemediği gözlenmiştir. 45 °C sıcaklığın üzerine çıktığında hem biyogaz miktarının hem de metan içeriğinin çok fazla değişiklik göstermediği görülmektedir.



Şekil 3.27. R5 reaktörü YSA sonuçları

En yüksek biyogaz üretimin gerçekleştirildiği R6 numaralı reaktörde gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde R5 reaktörüne benzer şekilde sıcaklığın artırılmasının biyogaz üretimini çok fazla etkilemediği görülmektedir. 45 °C ve 50 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen analizlerde biyogaz üretim miktarları birbirlerine oldukça yakın elde edilmiştir. En yüksek biyogaz üretim miktarına (4660,5 ml) ve en yüksek metan oranına (%69,5) ile 50 °C ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. R6 reaktörü YSA sonuçları

Biyogaz tesisleri atıklardan enerji üretimi amacıyla kurulmakta ancak tesisin işletilmesi sırasında enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Biyogaz tesislerindeki en yüksek enerji ihtiyacı tesisin ısı ihtiyacının karşılanması ve reaktörlerin karıştırılması işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Bir biyogaz tesisinde sadece karıştırma işlemi enerjinin tüketiminin yaklaşık olarak %51'ini oluşturmaktadır [80]. Biyogaz tesislerini ekonomik olarak daha uygulanabilir hale getirebilmek için hem biyogaz üretmek amacıyla kullanılan substrattan maksimum verimin alınabilmesi hem de işletme maliyetlerinin düşürülmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada bu amaçla üç farklı atığın kofermantasyonu gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar şartlarında elde edilen sonuçlar belirli koşullar altında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel olarak çalışılmamış olan koşullar için ise YSA kullanılarak tahmin modelleri üretilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde deneysel sonuçlar ile paralel olarak en yüksek biyogaz üretim miktarları R5 ve R6 numaralı reaktörlerde elde edilmiştir. R5 numaralı reaktörün YSA sonuçlarına göre en yüksek biyogaz üretimi 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilebilecektir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında en yüksek biyogaz üretimi 50 °C sıcaklıkta karıştırma işlemi yapılmadan 4500 ml olarak bulunurken, YSA analizi sonucunda 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında 4634,8 ml olarak elde edilebileceği bulunmuştur ancak metan oranlarında herhangi bir değişim olabileceği

gözenmemiştir. Diğer yandan 45 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızındaki analiz sonucuna göre 4580 ml biyogaz üretilebileceği ve biyogazın metan oranının değişmeyeceği görülmektedir. Toplam biyogaz üretim miktarları karşılaştırıldığında 45 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilebilecek toplam biyogaz üretim miktarı ile 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızındaki elde edilebilecek toplam biyogaz üretim miktarı arasında yalnızca %1'lik bir fark bulunmaktadır. Bu durumda reaktörün 50 °C sıcaklığa kadar ısıtılmasına gerek olmadığı görülmektedir.

R6 numaralı reaktörün YSA sonuçlarına göre en yüksek biyogaz üretimi 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilebilecektir. Deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında R5 numaralı reaktörde olduğu gibi 50 °C sıcaklıkta karıştırma işlemi yapılmada 4660,2 ml olarak bulunurken, YSA analizi sonucuna göre 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında 4660,5 ml olarak elde edilebileceği bulunmuştur. Diğer sıcaklık ve karıştırma hızlarındaki analiz sonuçları incelendiğinde 40 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında 4595,2 ml biyogaz üretilebileceği ve metan oranı %69,4 olarak elde edilebileceği bulunmuştur. R5 numaralı reaktörün analizinde olduğu gibi 40 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızında elde edilebilecek toplam biyogaz üretim miktarı ile 50 °C sıcaklık ve 100 rpm karıştırma hızındaki elde edilebilecek toplam biyogaz üretim miktarı arasında yalnızca %1'lik bir fark bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar YSA'nın biyogaz üretimi proseslerinde başarı bir şekilde kullanılabilceğini göstermiştir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen verilerin doğruluğunun kullanılmasında da YSA analizleri yol gösteri rol oynayabilmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Anaerobik reaktörlerde büyükbaş hayvan gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyunun kofermantasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda büyükbaş gübresi ana substrat olarak, tavuk gübresi ve peynir altı suyu yardımcı substratlar olarak kullanılmıştır. Bu nedenle denemelerde kullanılan reaktörler %50 oranında büyükbaş gübresi ile doldurulmuş ve tavuk gübresi ve peynir altı suyunun biyogaz üretimine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca karıştırma hızı ve sıcaklığın kofermantasyon üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Matlab programının yapaya sinir ağı modülünde biyogaz üretimi ve metan oranı tahmin edebilen modeller geliştirilmiştir.

Kofermantasyon denemelerinde farklı atık karışım oranlarında biyogaz ve metan üretim verimleri değerlendirilmiştir. Karıştırma işleminin günde bir kere manuel olarak gerçekleştirildiği ve 36 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen denemelerde, 30 günlük deneme süresi sonunda en yüksek biyogaz üretimi 4172,8 ml ile R6 numaralı reaktörde elde edilmiştir. En yüksek metan oranı ve biyogaz üretim verimine ise sırasıyla %69,63 ve 479,33 ml/gUKM ile R5 numaralı reaktörde ulaşılmıştır. Denemelerde elde edilen sonuçlar reaktör içerisindeki karışımda peynir altı suyu oranı arttığında reaktör içi dengesinin bozulduğunu göstermiştir. Ancak üretilen biyogazın metan oranının artmasında peynir altı suyunun katkısının olduğu görülmüştür. Ayrıca 50:40:10 büyükbaş gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu karışım oranında kimyasal ilavesi olmadan karışımın tamponlama kapasitesinin yeterli olduğu görülmüştür.

Karıştırma hızının kofermantasyona etkisi 100 rpm ve 200 rpm karıştırma hızlarında denenmiştir. Karıştırma işleminin yapıldığı reaktörler 36 °C sıcaklıkta çalıştırılmış ve karıştırma işlemi sürekli olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda yüksek hızda karıştırmanın biyogaz üretimini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Üretilen biyogazın metan oranında ise karıştırma hızına bağlı olarak çok fazla değişim olmadığı görülmüştür.

Biyogaz üretim sürecindeki en önemli parametrelerden bir tanesi olan sıcaklığın kofermantasyon üzerine etkisi mezofilik ve termofilik sıcaklıklarda denenmiştir. 38 ve 50 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen denemelerde karıştırma işlemi günde bir kere manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Denemelerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde termofilik sıcaklıkta daha fazla biyogaz üretildiğini göstermiştir. Ayrıca 50:30:20 büyükbaş gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu karışım oranında termofilik sıcaklıkta bütün denemelerdeki en yüksek metan oranına ulaşılmıştır.

Deneysel olarak elde edilen sonuçlar kullanılarak Matlab programının YSA modülünde toplam biyogaz üretim miktarı ve üretilen gazın metan içeriğini tahmin edebilen modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller sayesinde deneysel olarak çalışılmamış olan sıcaklık ve karıştırma hızı aralıkları analiz edilmiştir. Analizler neticesinde en yüksek toplam biyogaz üretimi ve metan oranına sahip olan reaktörlerde daha yüksek sıcaklıklar yerine daha düşük sıcaklık ve karıştırma hızlarında yüksek miktarda ve yüksek metan oranına sahip biyogaz üretilebileceği tespit edilmiştir.

Deneysel sonuçlar ve geliştirilen modellerden elde edilen bilgiler ışığında büyük baş gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyunun termofilik sıcaklıklarda ve düşük karıştırma hızlarında kofermantasyonu sonucunda yüksek miktarda ve yüksek metan oranına sahip biyogaz üretilebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkyılmaz O., Keskin T., Altuntaşoğlu Z., Kaya T., Ar F., Türkiye'nin Enerji Görünümü Oda Raporu, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, MMO/588, 1-239, 2012.
- [2] Bayrakçeken H., Çetnakaya K., Afyon Yöresinde Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı, *Afyon Kocatepe Fen Bilimleri Dergisi*, 1999, **1**(2), 99–108.
- [3] Uraz T., Peynir Suyu ve Değerlendirme Şekilleri, *Süt ve Mamulleri Teknolojisi SEGEM*, 1981, **1**(1), 208–215.
- [4] Kurt A., *Süt Teknolojisi*, 1. Baskı, Atatürk Üniversitesi Yayınları: No 573, Erzurum, 1990.
- [5] Taşdemirci E., Tek ve İki Kademeli Deney Sisteminde Peynir Altı Suyundan Biyogaz Üretiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 290451.
- [6] Ergüder T. H., Tezel U., Güven E., Demirer G. N., Anaerobic Biotransformation and Methane Generation Potential of Cheese Whey in Batch and UASB Reactors, *Waste Management*, 2001, **21**(7), 643–650.
- [7] Yazar E., Cırık K., Çınar Ö., Pilot Ölçekli Mezofilik Kesikli Anaerobik Reaktörde Peynir Altı Suyu Arıtımı ve Biyogaz Üretimi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2011, **14**(3), 28–32.
- [8] Kelleher B. P., Leahy J. J., Henihan A. M., O'Dwyer T. F., Sutton D., Leahy M. J., Advances in Poultry Litter Disposal Technology - A Review., *Bioresource Technology*, 2002, **83**(1), 27–36.
- [9] Font-Palma C., Characterisation, Kinetics and Modelling of Gasification of Poultry Manure and Litter: An Overview, *Energy Conversion Management*, 2012, **53**(1), 92–98.
- [10] Quiroga G., Castrillon L., Fernandez-Nava Y., Maranon E., Physico-Chemical Analysis and Calorific Values of Poultry Manure, *Waste Management*, 2010, **30**(5), 880–884.
- [11] Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Guiza M. S., Fonoll X., Peces M., Astals S., A Critical Review on Anaerobic Co-Digestion Achievements Between 2010 and 2013, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **36**(1), 412–427.

- [12] Krich K., Augenstein D., Batmale J., Benemann J., Rutledge B., Salour D., Production of Biogas by Anaerobic Digestion, Editor: Marsh M., *Biomethane from Dairy Waste - A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*, 1st ed., California, 29-46, 2005.
- [13] Normak A., Edström M., Luostarinen S., *Baltic Manure Wp6 Energy Potentials: Overview of Biogas Technology*, Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management, WP6-21617, 1-49, 2011.
- [14] Uçkun Kıran E., Stamatelatos K., Antonopoulou G., Lyberatos G., Production of Biogas Via Anaerobic Digestion, Editors: Luque R., Lin C. S. K., Wilson K., Clark J., *Handbook of Biofuels Production. Processes and Technologies*, 1st ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 259-301, 2011.
- [15] Meynell, P. J., *Methane: Planning a Digester*, 1th ed., Schocken Books, New York, 1976.
- [16] McCabe J., Eckenfelder N. W., Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, *American Journal of Public Health and The Nations Health*, 1985, 47(4), 497-498.
- [17] Deublein D., Steinhauser A., *Biogas From Waste and Renewable Resources*, 2nd ed., Wiley, Weinheim, 2010.
- [18] Gerardi M. H., *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- [19] Liu X., Yan Z., Yue Z. B., *Biogas, Comprehensive Biotechnology*, 2nd ed., Elsevier B.V., New York, 2011.
- [20] Rehm. H. J., Reed G., *Environmental Processes I: Biotechnology*, 2nd ed., Wiley - VCH, Weinheim, 1999.
- [21] Angelidaki I., Ellegaard L., Ahring B. K., *Applications of The Anaerobic Digestion Process, Biomethanation II.*, 1st ed., Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [22] Madigan M. T., Martinko J. M., Stahl D. A., Clark D. P., *Biology of Microorganisms*, 13th ed., Instrumentos Familiares, New York, 2012.
- [23] Seadi T. A., Rutz D., Prassl H., Köttner M, Volk T .F. S, *Biogas Handbook*, 2nd ed., University of Southern Denmark, Esbjerg, Denmark, 2014.
- [24] Boe K., Online Monitoring and Control of The Biogas Process, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, Institute of Environment & Resources, Lyngby, 2006.
- [25] Heinrich J., *Guide to Biogas from Production to Use*, 3th ed., Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe E.V., FNR-2012, 1- 232, 2012.

- [26] Verma S., Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Master's Thesis, Columbia University, Department of Earth & Environmental Engineering (Henry Krumb School of Mines), Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, New York, 2002.
- [27] Bochmann G., Montgomery L. F. R., Storage and Pre-Treatment of Substrates for Biogas Production, Editors: Wellinger A., Murphy J., Baxter D., *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, 1st ed., Elsevier, Cambridge, 85-103, 2013.
- [28] Jørgensen P. J., *Biogas-Green Energy*, 2nd ed., Aarhus University Press, Aarhus, 2009.
- [29] Buswell A. M., *Anaerobic Fermentators*, 1st ed., State Water Survey Division, Urbana, Illinois, 1936.
- [30] Karlsson A., Björn A., Yekta S.S., Svensson B.H., *Improvement of The Biogas*, Linköping University Press, Linköping, 2014.
- [31] Heinrich J., *Guide to Biogas From Production to Use*, 1th ed., Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, FNR-2008, 1-239, 2008.
- [32] Goma G., Advances in Biochemical Engineering, *Biomethanation I*, Editor: Ahring K. B., 4th ed., Springer-Verlag-Berlin Heidelberg Press, New York, 1979.
- [33] Switzenbaum M. S., Giraldo-Gomez E., Hickey R. F., Monitoring of The Anaerobic Methane Fermentation Process, *Enzyme and Microbial Technology*, 1990, **12**(10), 722–730.
- [34] Appels L., Baeyens J., Degreè J., Dewil R., Principles and Potential of The Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**(6), 755–781.
- [35] Uçkun Kiran E., Stamatelatos K., Antonopoulou G., Lyberatos G., Production of Biogas Via Anaerobic Digestion, 2nd ed., Editors: Luque R., Lin C. S. K., Wilson K., Clark J., *Handbook of Biofuels Production. Processes and Technologies*, 2nd ed., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2016.
- [36] Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M.S., Fonoll X., Peces M., Astals S., A Critical Review on Anaerobic Co-Digestion Achievements Between 2010 and 2013, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **36**(1), 412–427.
- [37] Braun R., Holm-Nielsen J. B., Seadi T. A. L., Potential of Co-digestion, *IEA Bioenergy*, Task-37, 1-16, 2002.
- [38] Wu W., Anaerobic Co-Digestion of Biomass for Methane Production: Recent Research Achievements, *Optimization*, 2007, **3**(1), 1–10.

- [39] Fausett L., *Fundamentals of Neural Networks Architectures, Algorithms and Applications*, 1st ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [40] Ünal M., Ak A., Topuz V., Erdal H., *Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms*, 1st ed., Springer Heidelberg, New York, 2013.
- [41] Steyl G., Application of Artificial Neural Networks in The Field of Geohydrology, Master's Thesis, University of the Free State, Institute of Groundwater Studies Faculty of Natural and Agricultural Sciences, Bloemfontein, 2009.
- [42] Beltratti A., Margarita S., Terna P., *Neural Networks for Economic and Financial Modelling*, 3th ed., International Thomson Computer Press, London, 1996.
- [43] Taşova O., Yapay Sinir Ağları ile Yüz Tanıma, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2011, 305570.
- [44] Ataseven B., Yapay Sinir Ağları İle Öngörü Modellemesi, *Öneri Dergisi*, 2013, **10**(39), 101–115.
- [45] Özçelik O., Assessment And Prediction of Water Quality Parameters in Lake Köyceğiz Using Artificial Neural Network Approach, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015, 416502.
- [46] Anderson D., Mc Neill G., Artificial Neural Networks Technology, A Dacs State-of-the-Art Report, *Kaman Sciences Corporation*, F30602-89-C-0082, 1-87, 1992.
- [47] Dias T., Fragoso R., Duarte E., Anaerobic Co-Digestion of Dairy Cattle Manure and Pear Waste, *Bioresource Technology*, 2014, **164**(1), 420–423.
- [48] Marañón E., Castrillón L., Quiroga G., Fernández-Nava Y., Gómez L., García M. M., Co-Digestion of Cattle Manure with Food Waste and Sludge to Increase Biogas Production, *Waste Management*, 2012, **32**(10), 1821–1825.
- [49] Borowski S., Domański J., Weatherley L., Anaerobic Co-Digestion of Swine and Poultry Manure with Municipal Sewage Sludge, *Waste Management*, 2014, **34** (2), 513–521.
- [50] Callaghan F. J., Wase D. A. J., Thayanithy K., Forster C. F., Continuous Co-Digestion of Cattle Slurry with Fruit and Vegetable Wastes and Chicken Manure, *Biomass and Bioenergy*, 2002, **22**(1), 71–77.
- [51] Rico C., Munoz N., Rico J. L., Anaerobic Co-Digestion of Cheese Whey and The Screened Liquid Fraction of Dairy Manure in a Single Continuously Stirred Tank Reactor Process: Limits in Co-Substrate Ratios and Organic Loading Rate, *Bioresource Technology*, 2015, **189**(1), 327–333.

- [52] Shilton A., Powell N., Broughton A., Pratt C., Pratt S., Pepper C., Enhanced Biogas Production Using Cow Manure to Stabilize Co-Digestion of Whey and Primary Sludge, *Environmental Technology*, 2013, **34**(17), 2491–2496.
- [53] Öztürk B., Evaluation of Biogas Production Yields of Different Waste Materials, *Earth Sciences Research Journal*, 2012, **2**(1), 165–174.
- [54] Comino E., Riggio V. A., Rosso M., Biogas Production by Anaerobic Co-Digestion of Cattle Slurry and Cheese Whey, *Bioresource Technology*, 2012, **114**(1), 46–53.
- [55] Kavacık B., Topaloğlu B., Biogas Production From Co-Digestion of a Mixture of Cheese Whey and Dairy Manure, *Biomass and Bioenergy*, 2010, **34**(9), 1321–1329.
- [56] Comino E., Rosso M., Riggio V., Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Whey Mix, *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21), 5072–5078.
- [57] Rico C., Muñoz N., Fernández J., Rico J.L., High-Load Anaerobic Co-Digestion of Cheese Whey and Liquid Fraction of Dairy Manure in a One-Stage UASB Process: Limits in Co-Substrates Ratio and Organic Loading Rate, *Chemical Engineering Journal*, 2015, **262**(1), 794–802.
- [58] Bertin L., Grilli S., Spagni A., Fava F., Innovative Two-Stage Anaerobic Process for Effective Codigestion of Cheese Whey and Cattle Manure, *Bioresource Technology*, 2013, **128**(1), 779–783.
- [59] Hublin A., Zokić T. I., Zelić B., Optimization of Biogas Production from Co-Digestion of Whey and Cow Manure, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, **17**(6), 1284–1293.
- [60] Parthiban R., Parthiban L., Back Propagation Neural Network Modeling Approach in The Anaerobic Digestion of Wastewater Treatment, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, **2**(4), 1944–1951.
- [61] Strik D. P. B. T. B., Domnanovich A. M., Zani L., Braun R., Holubar P., Prediction of Trace Compounds in Biogas From Anaerobic Digestion Using The Matlab Neural Network Toolbox, *Environmental Modelling & Software*, 2005, **20**(6), 803–810.
- [62] Qdais H. A., Bani K. H., Shatnawi N., Modeling and Optimization of Biogas Production from a Waste Digester Using Artificial Neural Network and Genetic Algorithm, *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**(6), 359–363.
- [63] Holubar P., Zani L., Hager M., Fröschl W., Radak Z., Braun R., Advanced Controlling of Anaerobic Digestion by Means of Hierarchical Neural Networks, *Water Research*, 2002, **36**(10), 2582–2588.

- [64] Jaroenpoj S., Yu Q. J., Ness J., Development of Artificial Neural Network Models for Biogas Production from Co-Digestion of Leachate and Pineapple Peel, *The Global Environmental Engineers*, 2014, **1**(1), 42–47.
- [65] Yusof T. R. T., Che-Man H., Abdul Rahman N. A., Hafid H. S., Optimization of Methane Gas Production from Co-Digestion of Food Waste and Poultry Manure Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology, *Journal of Agricultural Science*, 2014, **6**(7), 27–37.
- [66] Dareioti M. A., Kornaros M., Anaerobic Mesophilic Co-Digestion of Ensiled Sorghum, Cheese Whey and Liquid Cow Manure in a Two-Stage Cstr System: Effect of Hydraulic Retention Time, *Bioresource Technology*, 2015, **175**(14), 553–562.
- [67] Gelegenis J., Georgakakis D., Angelidaki I., Mavris V., Optimization of Biogas Production by Co-Digesting Whey with Diluted Poultry Manure, *Renewable Energy*, 2007, **32**(13), 2147–2160.
- [68] Rico Gutierrez J. L., Garcia P. A. E., Anaerobic Treatment of Wastewater in a Uasb Reactor, *Bioresource Technology*, 1991, **37**(11), 271–276.
- [69] Rodgers M., Zhan X. M., Dolan B., Mixing Characteristics and Whey Wastewater Treatment of a Novel Moving Anaerobic Biofilm Reactor, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2004, **39**(8), 2183–2193.
- [70] Borowski S., Weatherley L., Co-Digestion of Solid Poultry Manure with Municipal Sewage Sludge, *Bioresource Technology*, 2013, **142**(1), 345–352.
- [71] Borowski S., Kucner M., Czyrowska A., Berrowska J., Co-Digestion of Poultry Manure and Residues from Enzymatic Sacharification and Dewatering of Sugar Beet Pulp, *Renewable Energy*, 2016, **99**(1), 492–500.
- [72] Lettinga G., Anaerobic Digestion for Energy Saving and Production, *Energy Efficiency Council Conference*, Brighton, England, 2-4 April 1980.
- [73] Rivard C. J., Himmel M. E., Vinzant T. B., Adney W. S., Wyman C. E., Grohmann K., Anaerobic Digestion of Processed Municipal Solid Waste Using a Novel High Solids Reactor: Maximum Solids Levels and Mixing Requirements, *Biotechnology Letters*, 1990, **12**(3), 235–240.
- [74] Stroot P. G., McMahon K. D., Mackie R. I., Raskin L., Anaerobic Codigestion of Municipal Solid Waste and Biosolids Under Various Mixing Conditions - II: Microbial Population Dynamics, *Water Research*, 2001, **35**(7), 1804–1816.
- [75] Whitmore T. N., Lloyd D., Jones G., Williams T. N., Hydrogen-Dependent Control of The Continuous Anaerobic Digestion Process, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1987, **26**(4), 383–388.

- [76] Chen Y. R., Varel V. H., Hasimoto A. G., Effect of Temperature on Methane Fermentation Kinetics of Beef-Cattle Manure, *Biotechnology and Bioengineering No. 10*, Hawai, USA, 12-15 May 1980.
- [77] Mackie R. I., Bryant M. P., Anaerobic Digestion of Cattle Waste at Mesophilic and Thermophilic Temperatures, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(2), 346–350.
- [78] Zinder S. H., Anguish T., Cardwell S. C., Effects of Temperature on Methanogenesis in a Thermophilic Anaerobic Digester, *Applied and Environmental Microbiology*, 1984, **47**(4), 808–813.
- [79] Kumar S., Batish A., Singh R., Singh T. P., A Hybrid Taguchi-Artificial Neural Network Approach to Predict Surface Roughness During Electric Discharge Machining of Titanium Alloys, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, **28**(7), 2831–2844.
- [80] Lemmer A., Naegele H. J., Sondermann J., How Efficient are Agitators in Biogas Digesters? Determination of the Efficiency of Submersible Motor Mixers and Incline Agitators by Measuring Nutrient Distribution in Full-Scale Agricultural Biogas Digesters, *Energies*, 2013, **6**(12), 6255–6273.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Çalhan R.**, Kaya D., Kılıç F. Ç., Eyidoğan M, Sapmaz S., The Effect of Temperature on Biogas Production by Co-Digestion of Cattle Manure with Poultry Manure and Cheese Whey, *3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering*, Nevşehir, Türkiye, 24-27 Nisan 2017.
- [2] **Çalhan R.**, Kaya D., Çoban V., Determination of Optimum Conditions for Co-Digestion of Cattle Manure with Chicken Wastes and Cheese Whey, *International Journal of Ecosystems and Ecology Sciences*, 2016, **6**(3): 375-380.
- [3] **Çalhan R.**, Kaya D., Tulger G. Eyidoğan M., Organik Gübre Kurutma Teknolojileri: Akışkan Yataklı Kurutucular, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 2012, **23**(634), 22-33.
- [4] Çiner F., **Çalhan R.**, Selçuk H., Nanopartiküllerin Oluşumu Çevredeki Etkileri, Davranışı, Akıbeti: Tekstil Nanopartikülleri, *9. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Samsun, Türkiye, 5-8 Ekim 2011.
- [5] Kaya D., **Çalhan R.**, Tulger G., Eyidoğan M., Polat R., Organik Gübre Kurutma Teknolojileri, Akışkan Yataklı Kurutucular, *2. Ulusal Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar Çalıştayı*, Tokat, Türkiye, 24-25 Mayıs 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Denizli’de doğdu. İlk öğrenimini Dentaş ilköğretim okulunda tamamladı. Liseyi Denizli Cumhuriyet Lisesi (Yabancı Dil Ağırlıklı)’ da tamamladı. 2005 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı. 2009 yılında Çevre Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2009 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 2012 yılında mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.