

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BİR BİYOGAZ TESİSİNDE BAZI PARAMETRELERİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Hakan GÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Murat TOPAL

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİR BİYOGAZ TESİSİNDE BAZI PARAMETRELERİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Hakan GÜL
(200020008)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Murat TOPAL

TUNCELİ-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİR BİYOGAZ TESİSİNDE BAZI PARAMETRELERİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

Hakan GÜL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez / /2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Murat TOPAL
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

Doç.Dr.E.İşıl ARSLAN TOPAL
(Fırat Üniversitesi)

ÜYE

Doç.Dr.Mehmet Yavuz PAKSOY
(Munzur Üniversitesi)

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Doç. Dr. Murat KORUNUR
Enstitü Müdürü

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: YLMUB021-25

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hakan GÜL

Danışman
Doç. Dr. Murat TOPAL

TEŞEKKÜR

Hayat boyu öğrenme ve kendimi geliştirmem de her zaman maddi ve manevi desteği ile yanımda olan başta abim olmak üzere tüm aileme, deneysel çalışmalar, laboratuvar ve ekipman kullanımı konusunda destek veren hali hazırda çalışmakta olduğum Doğustar Elektrik Üretim A.Ş.'ne ve çalışanlarına, biyogaz tesisi işletme ve süreç yönetiminde bilgi birikimini aktaran ve şahsıma güvenerek sorumluluk almama vesile olan Çevre Mühendisi Şerif YAKUT'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmam boyunca bana bilgi ve deneyimleriyle her zaman yol gösteren, çalışmalar konusunda beni cesaretlendiren, deneysel çalışmalarda ve analizlerde bilgi ve her türlü desteği veren değerli Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Murat TOPAL'a teşekkür ederim. Her daim desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. E. Işıl ARSLAN TOPAL ve Dr. Öğr. Üyesi Erdal ÖBEK hocalarıma da teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasını YLMUB021-25 nolu projeyle destekleyen Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Hakan GÜL
TUNCELİ - 2023

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	V
KISALTMALAR LİSTESİ	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Biyogaz Hakkında Genel Bilgiler.....	1
1.2. Biyogaz Tesisi Tipleri	3
1.2.1. Kesikli beslemeli tip	3
1.2.2. Sürekli beslemeli tip	3
1.3. Anaerobik Çürütme	6
1.4. Biyolojik Süreçler.....	7
1.5. İşletme Parametrelerinin Optimizasyonu	10
1.6. Birlikte Çürütme	12
1.7. Substratların Ön Arıtımı	12
1.8. Çürütülmüş Ürünün Kullanımı	14
1.9. Çevresel Etkiler ve Kirlilik Azaltma Stratejileri	16
2. MATERYAL VE METOT	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	19
3.1. Birinci Çürütücü	19
3.2. İkinci Çürütücü	22
3.3. Biyogazın Değerlendirilmesi	26
3.4. Biyogaz Tesisinden Elde Edilen Gübrenin Element İçeriği	29
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
5. KAYNAKLAR.....	33
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Biyogaz üretiminin akış şeması	2
Şekil 1.2. Kesikli beslemeli tip biyogaz üretimi	4
Şekil 1.3. Sürekli beslemeli tip biyogaz üretimi	4
Şekil 1.4. Anaerobik çürütücü bağlantıları.....	6
Şekil. 2.1. Biyogaz tesisi, numune alımı ve gaz ölçümleri	18
Şekil 3.1. Birinci çürütücüye ait pH değerleri.....	19
Şekil 3.2. Birinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri	20
Şekil 3.3. Birinci çürütücüye ait katı madde değerleri	21
Şekil 3.4. Birinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri.....	22
Şekil 3.5. İkinci çürütücüye ait pH değerleri.....	23
Şekil 3.6. İkinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri	24
Şekil 3.7. İkinci çürütücüye ait katı madde değerleri.....	25
Şekil 3.8. İkinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri.....	26
Şekil 3.9. Biyogaz tesisinin CH ₄ değerleri	27
Şekil 3.10. Biyogaz tesisinin H ₂ S değerleri.....	28
Şekil 3.11. Biyogaz tesisinin O ₂ değerleri	29

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Anaerobik çürütmenin avantaj ve dezavantajları	7
Tablo 1.2. Anaerobik çürütmenin işletimi ve proses mekanizması	8
Tablo 1.3. Anaerobik çürütme için ön arıtma yöntemlerinin özeti	13
Tablo 1.4. Çürüme ürününün fiziksel ve kimyasal özellikleri	15
Tablo 1.5. Anaerobik çürütücü için emisyon kaynağı ve azaltma stratejileri	16



KISALTMALAR LİSTESİ

CH₄	: Metan
CO₂	: Karbondioksit
H₂S	: Hidrojen Sülfür
KM	: Katı Madde
OKM	: Organik Katı Madde



ÖZET

Bu tez çalışmasının ana amacı, Malatya ilinde bulunan biyogaz tesisinin işletilmesinde bazı parametrelerin değerlendirilmesidir. Bu amaçla, biyogaz tesisinde bulunan iki adet çürütücüye ait pH, sıcaklık, katı madde (KM) ve organik katı madde (OKM) verileri ile çürütücülerden elde edilen CH₄, H₂S ve O₂ verileri aylara göre değerlendirildi. Ayrıca, biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde bazı elementler (Be, Na, Al, K, Ca, Mo, Ba ve B) tespit edildi. Elde edilen verilere göre, çürütücülere ait pH değerlerinin 7,63-7,72 arasında, sıcaklık değerleri 36,09-38,32 °C arasında, KM değerleri %5,40-6,40 arasında ve OKM değerleri %62,27-66,50 arasındaydı. Biyogaz tesisinde elde edilen CH₄ değerleri %55,72-56,49 arasında, H₂S değerleri 1483,07-1593 ppm arasında ve O₂ değerleri %0,56-0,57 arasındaydı. Biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde en yüksek element konsantrasyonu kalsiyum için 49067 mg/kg, en düşük element konsantrasyonu molibden için 2,17 mg/kg'dı. Sonuç olarak, biyogaz tesisinin metan oluşum değeri ve diğer parametreleri incelendiğinde tesisin verimli bir şekilde işletildiği belirlendi.

Anahtar kelimeler: Biyogaz, gübre, katı madde, organik katı madde, metan

ABSTRACT

Evaluation of Some Parameters in a Biogas Plant

The main purpose of this thesis is to evaluate some parameters in the operation of the biogas plant in Malatya province. For this purpose, pH, temperature, solid matter (SM) and organic solid matter (OSM) data of two digesters in the biogas plant and CH₄, H₂S and O₂ data obtained from digesters were evaluated according to months. In addition, some elements (Be, Na, Al, K, Ca, Mo, Ba and B) were detected in the manures obtained from the biogas plant. According to the data obtained, pH values of digesters were between 7.63-7.72, temperature values were between 36.09-38.32 °C, SM values were between 5.40-6.40% and OSM values were between 62.27-66.50%. It was determined that the CH₄ values obtained in the biogas plant were between 55.72-56.49%, the H₂S value were between 1483.07-1593 ppm, and the O₂ value were between 0.56-0.57%. In the fertilizers obtained from the biogas plant, the highest elemental concentration was 49067 mg/kg for calcium, and the lowest elemental concentration was 2.17 mg/kg for molybdenum. As a result, when the methane formation value and other parameters of the biogas plant were examined, it was determined that the plant was operated efficiently.

Key words: Biogas, manure, methane, organic solid matter, solid matter

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve endüstrileşmeye bağlı olarak kentsel katı atık miktarları da artmaktadır. Bu durum, pek çok ülke ve şehirde temel çevre sorunlarından biri haline gelmektedir. Birçok ülkede ve şehirde sürdürülebilir atık yönetimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması önemli bir konu haline gelmiştir. Çevre standartlarının giderek daha katı hale gelmesinden dolayı atıkların geri kazanımı ve geri dönüşümü oldukça önemlidir.

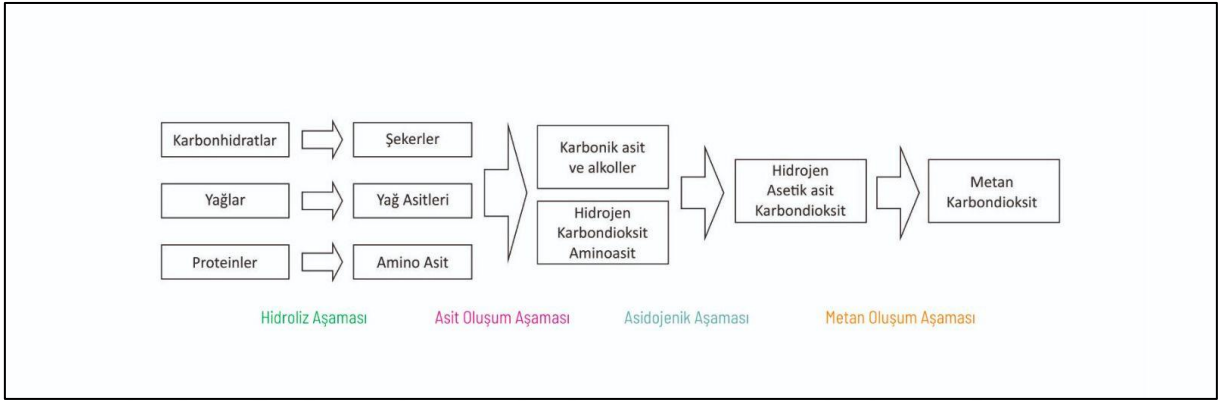
2050 yılına kadar, dünyada insan nüfusunun 6,8 milyardan 9 milyara çıkacağı tahmin edilmektedir. Nüfusa bağlı olarak enerji talebinin ise neredeyse iki katına çıkması beklenmektedir. Bu durum, su ve gıda talebinin de yaklaşık %60 artmasına neden olacağı beklenmektedir. Bu talepleri karşılamak için GES bağlantısı olarak bilinen gıda, enerji ve su arasındaki bağlantı dikkate alınarak sınırlı doğal kaynakların araştırılmasını gerektirir (Wolfe ve ark., 2016). Ayrıca, küresel bir sorun haline gelen organik atık üretiminin artarak devam etmesi beklenmektedir. Bu husus uygun bir şekilde ele alınmazsa, büyük hacimli organik atık, hava, su ve toprak kalitesini bozarak gıda, enerji ve su kaynakları üzerinde önemli etkilere neden olabilir. Bu nedenle, organik atıkların yeniden kullanımı ve kazanımı, GES bağlantısında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çerçevede, organik atıkların yeniden kullanımı ve geri kazanımı kapsamında biyogaz tesislerinin enerji üretiminde önemli bir role sahip olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında da Malatya ilinde bulunan bir biyogaz tesisi incelendi ve biyogaz tesisinin işletilmesinde bazı parametreler değerlendirildi. Bu amaçla, biyogaz tesisinde bulunan iki adet çürütücüye ait pH, sıcaklık, katı madde (KM) ve organik katı madde (OKM) verileri ile çürütücülerden elde edilen CH_4 , H_2S ve O_2 verileri aylara göre değerlendirildi.

1.1. Biyogaz Hakkında Genel Bilgiler

Biyogaz, organik atıkların kapalı bir ortamda parçalanması ve oksijen yokluğunda üretilen bir yakıttır. Biyogaz, temiz enerjinin iyi bir kaynağıdır. Biyogazın diğer bir adı bataklik gazıdır. Biyogazın ana içeriği yaklaşık %55 ila 65 metan ve yaklaşık %30 ila 40 karbondioksittir (Kaygusuz ve Kaygusuz, 2002). Bunun dışında biyogazda çok küçük yüzdelere kadar amonyak ve hidrojen sülfürde vardır. Biyogazın kalorifik değeri 5000 ila 5500 kcal/kg arasındadır. İçten yanmalı motorlar için aydınlatma, pişirme, kurutma ve yakıt

kullanımı için uygundur. Biyogazın depolanması ve sıvılaştırılması zordur. Biyogaz, organik materyalin anaerobik fermantasyon yoluyla üretilebilir. Hayvan atıkları, mahsul artıkları, kentsel atıklar biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca, şeker kamışı çöpleri, pirinç kabuğu, tütün atıkları, pamuk tozu, çay atıkları, meyve ve sebze atıkları, ağaç dalları ve yaprakları gibi diğer malzemeler de biyogaz tesisinde hammadde olarak kullanılabilir. Hayvan veya bitkiden elde edilen ve biyolojik olarak kolayca parçalanabilen herhangi bir organik selüloz materyali, biyogaz üretimi için potansiyel bir hammaddedir. Biyogaz üretiminde gerçekleşen safhalar Şekil 1.1’de verilmiştir (Bhat ve ark., 2001; Prakash ve ark., 2015).



Şekil 1.1. Biyogaz üretiminin akış şeması

Biyokütle açık havada ayrıştığında, karbondioksit ve amonyak üretmek için aerobik bakteriler tarafından harekete geçirilir; böylece toplam karbon bileşeni, karbon dioksit üretmek üzere oksitlenir. Biyogaz üretiminde ise organik maddeler anaerobik bakteriler tarafından karbon dioksit ve metan (CH₄) üretmek üzere indirgenir. Bu bakteriler çok daha az oksijenle yaşar ve büyür. Süreç genellikle, karanlık koşullarda ılık ortamlarda yürütülür. Dönüştürme için kullanılan hava geçirmez konteynere çürütücü denir. Dönüştürme işlemine ise anaerobik fermantasyon denir. Biyogaz üretimi için süreç üç aşamada gerçekleşir (Bhat ve ark., 2001). Bunlar;

Aşama 1. – Kompleks bir bileşik (karbonhidratlar, proteinler ve yağlar) içeren organik maddenin hidroliz adı verilen su varlığında parçalandığı bir çürütücüde gerçekleşir. Büyük polimer molekülleri, küçük monomer moleküllerine indirgenir. Bu işlemler bir çürütücüde 25°C’de bir veya iki günde tamamlanır.

Aşama 2. – Oksijensiz büyüeyebilen anaerobik bakteriler, asetik ve propiyonik asit üreten asit dönüştürücüler olarak ifade edilir. Bu aşamada karbondioksit açığa çıkar ve bu aşama 25°C'de yaklaşık bir gün sürer.

Aşama 3. – Bu aşamada anaerobik bakteri reaksiyonu nedeniyle metan, karbondioksit ve daha az miktarda hidrojen gazı üretilir. Bu işlemler, 25°C'de yaklaşık iki hafta sürer.

1.2. Biyogaz Tesisi Tipleri

Biyogaz elde edilmesi amacıyla farklı tipte tesis tipleri kullanılabilmektedir. Bunlar kesikli ve sürekli beslemeli tipte çalıştırılan sistemlerdir.

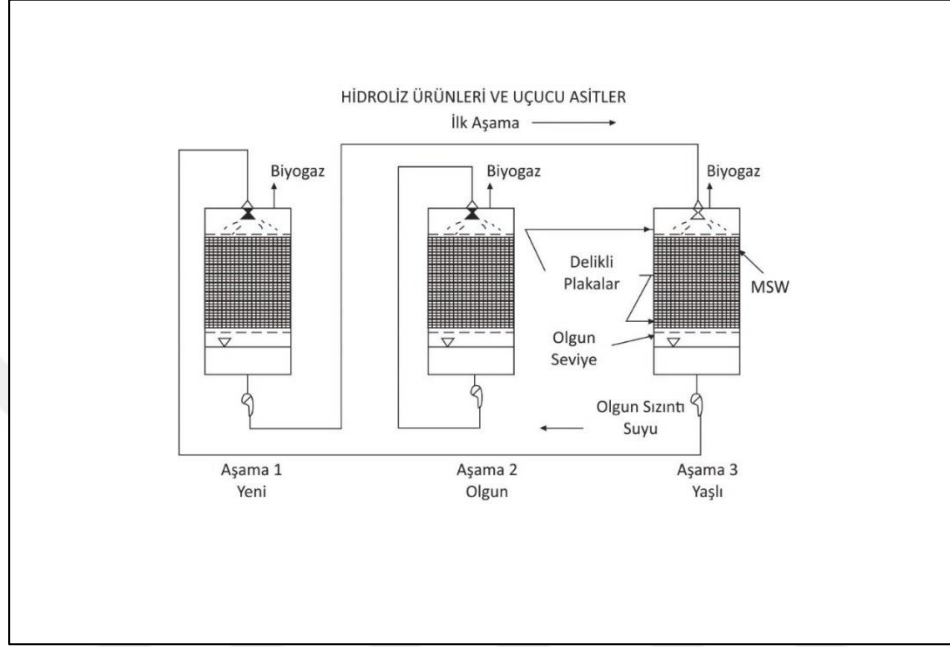
1.2.1. Kesikli beslemeli tip

Bu tür bir tesis her 50 ila 60 günde bir besleme gerektirir. Beslemeden sonra 8 ila 10 gün gaz verilmesi gerekir ve sindirim işlemi tamamlanana kadar 40 ila 50 gün boyunca sürekli olarak boşaltılır ve yeniden doldurulur. Ortak bir gaz tutucu aracılığıyla düzenli bir gaz beslemesini sağlamak için çürütücüler birer birer doldurulur ve boşaltılır. Bu tür tesislerin kurulumu ve işletilmesi zordur. Büyük ölçekte çalıştırılmadıkça ekonomik değildirler. Bu tür tesisler, çoğunlukla Avrupa ülkelerinde kurulur (Khan, 2009). Kesikli beslemeli tip biyogaz üretimi Şekil 1.2'de gösterilmiştir (Bhat ve ark., 2001; Prakash ve ark., 2015).

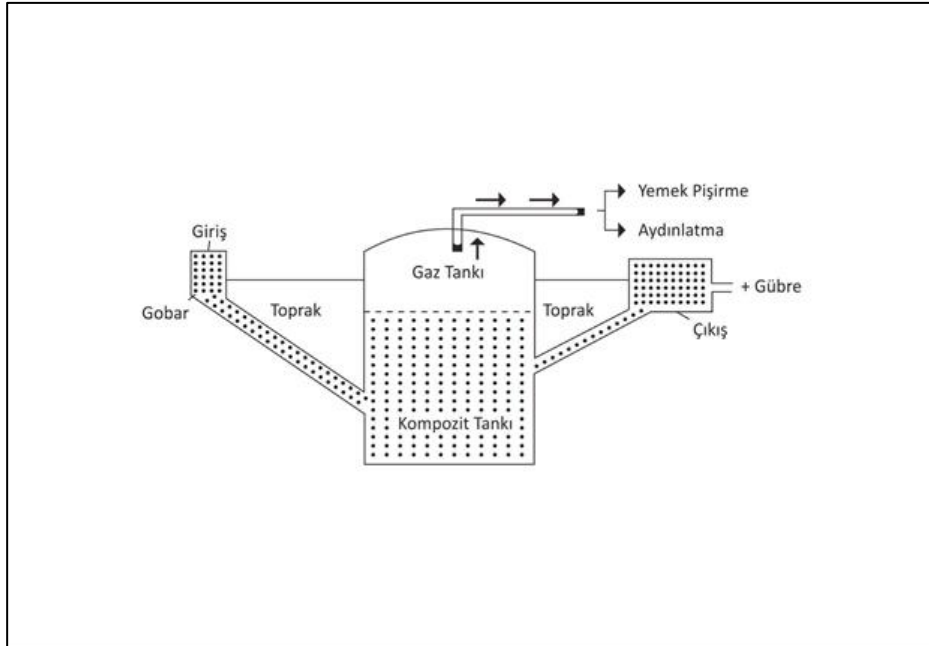
1.2.2. Sürekli beslemeli tip

Bu tür bir tesis, belirli bir miktarda biyokütle ile günlük beslenmeyi gerektirir. Gaz, bir tesiste veya ayrı bir gaz tutucuda depolanır ve daha fazla kullanım için hazırdır. Biyokütle, çürütücüden yavaşça geçirildiğinde tamamen çürütülür ve çürütülen çamur bir çıkış yoluyla dışarı verilir. Biyokütlenin çürütücüde kaldığı süre alıkonma süresi olarak bilinir. Bu süre esas olarak biyokütlenin tipine ve çalışma sıcaklığına bağlıdır. Tesis sürekli olarak çalıştırılır ve yalnızca çamurun, yani çürütülmemiş biyokütle kalıntısının uzaklaştırılması için durur. Çamurun tepesinde oluşan ince kuru tabaka, pislik olarak bilinir. Pisliğin işlevi, çamurdan gazın kaçmasını önlemektir. Katmanın parçalanması, çamurun yavaş karıştırıldığında gerçekleşir ve daha iyi karışması nedeniyle çürütme sürecine de yardımcı olur. Bu tür

tesislerin beslenme düzeni, günlük atık üretimine uygundur ve depolanmasını gerektirmez. Bu tür tesisler çoğunlukla Hindistan ve Çin'de popülerdir (Khan, 2009). Sürekli beslemeli tip biyogaz üretim şekli Şekil 1.3'te gösterilmiştir (Khan, 2009; Prakash ve ark., 2015).



Şekil 1.2. Kesikli beslemeli tip biyogaz üretimi



Şekil 1.3. Sürekli beslemeli tip biyogaz üretimi

Biyogaz öncelikle biyogazın bir kazanda veya kombine ısı ve güç ünitesinde yakılmasıyla ısı ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır (Holm-Nielsen ve ark., 2009). Kombine ısı ve güç için, 300 ppm'den daha yüksek konsantrasyonlar, H_2SO_4 'e dönüştürüldükten sonra borularda korozyona neden olabileceğinden, H_2S 'in uzaklaştırılması gerekir (Yang ve ark., 2014). Ancak, kombine ısı ve güç kullanımının önündeki bir engel, enerji dönüşüm birimleriyle ilişkili yüksek maliyettir (Yang ve ark., 2014).

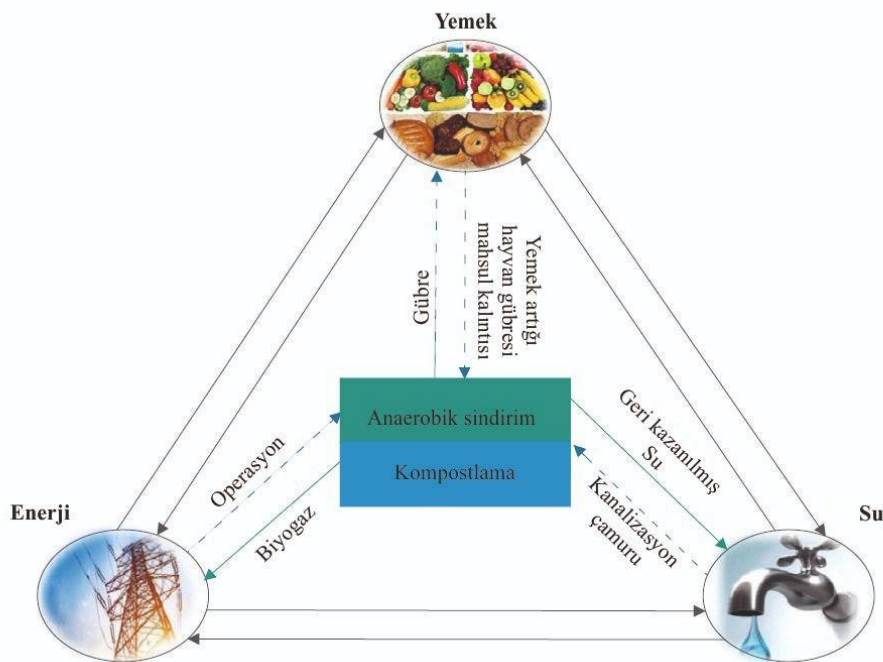
Biyogaz, yüksek metan saflığı gerektiren doğal gaz boru hatları aracılığıyla bir ulaşım yakıtı veya dağıtım olarak kullanım için biyometana dönüştürülebilir. Örneğin, bir doğal gaz boru hattı, sırasıyla %3'ten az CO_2 , su ve H_2S , 112 mg/m^3 ve 4 ppm ile saflaştırılmış biyogaz gerektirir (Yang ve ark., 2014). Bununla birlikte, doğal gaz arzını büyük ölçüde artıran kaya gazının gelişmesi nedeniyle vergi kredileri hesaba katılmadıkça biyometanın fiyatı rekabetçi değildir (Kim, 2014). Biyometanın benzin gibi daha değerli bir ürüne dönüştürülmesine ilgi vardır. Biyogaz dönüşümü için kimyasal ve/veya biyolojik yöntemler kullanan gelişen teknolojiler yakın zamanda gözden geçirilmiştir (Yang ve ark., 2014; Ge ve ark., 2014).

Fischer-Tropsch sentezi gibi kimyasal dönüştürme yöntemleri ticari olarak mevcuttur ancak pahalı metal katalizörler gerektirebilir (Yang ve ark., 2014). Biyogazın sıvı yakıtlara biyolojik olarak dönüştürülmesi, ortam sıcaklıkları ve basıncı altında gerçekleştirilebilmesi ve dolayısıyla maliyetli tesisler gerektirmemesi nedeniyle umut verici bir seçenektir (Yang ve ark., 2014; Ge ve ark., 2014). Ayrıca mevcut anaerobik çürütme tesisleriyle ekonomik olarak entegre olma potansiyeline de sahiptir (Ge ve ark., 2014). Örneğin, metanotroflar çürüme ürününden başarılı bir şekilde izole edilir ve biyogazı doğrudan benzinle karıştırılabilen veya yüksek değerli kimyasalların öncüsü olarak kullanılabilen metanole dönüştürmek için kullanılabilir (Sheets ve ark., 2016). Bu biyolojik dönüşüm, CO_2 veya H_2O 'nun uzaklaştırılmasını gerektirmez ve mikrobiyal üretkenliği ve inhibitörlere (örn. H_2S , NH_3) toleransı geliştirmek için daha fazla araştırma yürütülmektedir.

Biyogazı alkoller, benzin, plastikler ve yüksek değerli kimyasallar gibi diğer katma değerli ürünlere dönüştürmek için mikroorganizmaları tanımlamak veya genetik olarak değiştirmek için ek çalışmalara da ihtiyaç vardır.

1.3. Anaerobik Çürütme

Anaerobik çürütme, organik atık yönetimi ve besin geri dönüşümü için uygun bir yaklaşımdır ve gıda-enerji-su bağlantısı içinde etkileşime girer. Anaerobik çürütme, organik maddeyi biyogaza ve çamura dönüştüren anaerobik biyolojik bir süreçtir (Li ve ark., 2011) (Şekil 1.4). Anaerobik çürütme, lignoselülozik biyokütle, gıda atıkları, hayvan gübresi ve kanalizasyon çamuru dahil olmak üzere çeşitli organik atıkları parçalamak için kullanılmaktadır (Mata-Alvarez ve ark., 2014). Biyogaz, esas olarak, yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilen ve fosil yakıt bazlı enerji üretimi için su tüketimini azaltan metan içerir (Yang ve ark., 2014). Fermente olan çamur besin açısından zengindir ve potansiyel olarak toprak düzenleyici olarak kullanılabilir (Sheets ve ark., 2015a). Bu nedenle, anaerobik çürütücü kullanmak yalnızca organik atıklarla ilişkili çevresel riskleri azaltmakla kalmaz, aynı zamanda gıda, enerji ve su güvenliğini de artırır.



Şekil 1.4. Anaerobik çürütücü bağlantıları

Anaerobik çürütme organik atık arıtımı için yaygın olarak kullanılmaktadır ve bazı avantajları ve dezavantajları vardır (Tablo 1.1) (Kumar, 2011; Mata-Alvarez, 2014). Anaerobik çürütmenin kompostlamaya göre daha düşük bir toplam karbon kaybına sahip olmasına rağmen, bozunan karbonun yarısından fazlasının anaerobik çürütme yoluyla

yenilenebilir bir enerji taşıyıcısı olarak metana dönüştürülür. Ayrıca termofilik anaerobik çürütme, besin açısından zengin son ürünler üretir.

Tablo 1.1. Anaerobik çürütmenin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Küçük alan ihtiyacı	Yavaş bozunma
Koku azaltımı	Sistem kararsızlığı
Enerji üretimi	İlk yatırım maliyeti

Anaerobik çürütmede ele alınması gereken bazı sorunları vardır (Tablo 1.1). AÇ, potansiyel sistem kararsızlığı, düşük biyogaz verimliliği ve yan ürün kullanımı için mevzuat eksikliği ile karşı karşıyadır (Sheets ve ark., 2015a; Yang ve ark., 2015a). Buradaki sorunların tümü, anaerobik çürütmenin uygulanabilirliği üzerinde önemli etkileri vardır ve bu durum sonuç olarak GES bağıntısı içinde sürdürülebilirliklerini etkiler. Son zamanlarda, süreç verimliliğini artıran, süreç ekonomisini optimize eden ve olumsuz çevresel etkileri azaltan stratejilerle anaerobik çürütmeyi iyileştirmek için çaba sarf edilmektedir (Zheng ve ark., 2014; Hosseini Koupaie ve ark., 2014; Xu ve ark., 2014a; Sheets ve ark., 2015a; Lin ve ark., 2015; Yang ve ark., 2015b; Tiwary ve ark., 2015). Anaerobik çürütme ile ilgili yayınların sayısı son on yılda önemli ölçüde artmıştır.

1.4. Biyolojik Süreçler

Anaerobik çürütmenin farklı bozunma mekanizmaları vardır. Anaerobik çürütme süreci oksijensiz koşullar altında gerçekleşir ve esas olarak şunları içerir; hidroliz, asit oluşumu, asetat oluşumu ve metan oluşumudur (Li ve ark., 2011) (Tablo 1.2). İlk üç adım, karbon dioksit ve/veya hidrojen üretimi ile hidrolitik bakteriler ve asit oluşturan bakteriler tarafından kompleks polimerleri asetata dönüştürür. Son adım, metanojenik arkealar ile asetatı, karbon dioksit ve hidrojene dönüştürür. Bu bakteriler ve arkealar arasındaki etkileşimler karmaşıktır ve herhangi bir dengesizlik anaerobik çürütmenin performansını etkileyebilir (Li ve ark. 2015). Anaerobik çürütme tipik olarak ısıtma gerektirir ve mezofilik (35-40 °C) veya termofilik (50-60 °C) sıcaklıklarda çalıştırılabilir (Li ve ark. 2011; De Baere ve Mattheeuws, 2012). *Phyla Firmicutes*, *Bacteroidetes* ve *Actinobacteria*'ya ait bazı fakültatif hidrolitik ve asit oluşturan bakteriler anaerobik çürütmede mevcuttur (Partanen ve ark., 2010; Botheju ve Bakke, 2011; Zhang ve ark., 2014a; Wang ve ark., 2017).

Tablo 1.2. Anaerobik çürütmenin işletimi ve proses mekanizması

Parametreler	Anaerobik çürütme	
Aşamalar	Asit oluşumu	Metanlaşma
Sıcaklık	35-60 °C	35-60 °C
Proses	Organik madde → Uçucu yağ asitleri, CO ₂ , H ₂ vb.	Asetat, CO ₂ , H ₂ → CH ₄ , CO ₂
Bakteriler	Mezofilik (35-40 °C) Firmicutes Bacteroidetes Chloreflexi Actinobacteria Proteobacteria Spirochaete Tenericutes Thermotogae Synergistetes Termofilik (50-60 °C) Firmicutes Thermotogae Bacteroidetes Synergistetes	Mezofilik (35-40 °C) Methanosarcina Methanosaeta Termofilik (50-60 °C) Methanothermobacter Methanoculleus Methanosarcina
Mikrobiyal büyüme	Mezofilik: 0.192-0.256 1/gün Termofilik: 0.243–0.410 1/gün	
Bozunma	Termofilik AÇ, mezofilik AÇ'den daha yüksektir, ancak yine de kompostlaştırmadan daha düşüktür; çok sınırlı lignin bozulması	
TKM içeriği	% 5-35	
C/N oranı	20-30	
Çalkalama	Çalkalamalı veya çalkalamasız	
Isıtma	Genellikle ek ısıtma gerektirir	
Önemli tasarım parametreleri	Aşılama, sıcaklık, toplam katı içeriği, C/N oranı vb.	

Mezofilik anaerobik çürütme, termofilik anaerobik çürütme ile karşılaştırıldığında, mezofilik anaerobik çürütmenin daha yüksek bakteri zenginliğine, düzgünlüğüne ve organik yükleme artışıyla bakteriyel filogenin daha büyük olmasına sahip olduğu ifade edilebilir. Bu durum, mezofilik anaerobik çürütmenin daha stabil olduğunu gösterebilir (Guo ve ark., 2014; Li ve ark., 2015) (Tablo 1.2). Ayrıca, mezofilik şartlar altında metanın yaklaşık %70'i asetotrofik metanojenler tarafından üretilirken (Maçsen ve ark., 2011), termofilik şartlar altında metanın %80'i hidrojenotrofik metanojenler tarafından üretilir (Sasaki ve ark., 2011; Guo ve ark., 2014; Li ve ark., 2015) (Tablo 1.2). Bu hidrojenotrofik metanojenler, düşük pH

nedeniyle yüksek organik yüklemeye sahip mezofilik sistemlerinde de baskın olabilir (Li ve ark., 2015; Ros ve ark., 2017). Pratikte anaerobik çürütme prosesindeki metan verimi teorikteki metan potansiyelinin %60'ından daha azdır (Wu ve He, 2013) ve metan verimini artırmak ve hızlı bir parçalanmayı kolaylaştırmak, anaerobik çürütme sürecinin hassas kontrolünü ve optimizasyonunu gerektirir.

Gıda, enerji ve su sektörlerinden gelen çok çeşitli organik atıklar anaerobik çürütücüler için substrat olarak kullanılabilir (Kumar, 2011; Li ve ark., 2011; De Baere ve Mattheeuws, 2012; Mata-Alvarez ve ark., 2013).

Tarımsal atıklar, orman kalıntıları ve enerji bitkilerinde lignoselülozik biyokütle bol miktarda bulunur (Ge ve ark., 2016). 2012'de ABD'de yaklaşık 300 milyon ton lignoselülozik biyokütlenin yaklaşık %70'i gıda sektöründen elde edilmiştir (Balan, 2014). Lignoselülozik biyokütle genellikle yüksek karbon-azot (C/N) oranına sahip (> 50), yüksek gözenekli ve zayıf tampon kapasitesine sahiptir. Lignoselülozik biyokütlenin biyolojik olarak parçalanabilirliği, organik bileşenlerinin bileşiminden büyük ölçüde etkilenir; selüloz (%9-80), hemiselüloz (%10-50) ve lignin (%5-35) (Zheng ve ark., 2014; Yang ve ark., 2015a). Biyogaz üretimi için çeşitli lignoselülozik biyoküteller incelenmiş ve biyokimyasal metan potansiyelleri 107 ila 481 L/kg uçucu madde arasında değiştiği belirlenmiştir (Raposo ve ark., 2012). Lignoselülozik biyokütlenin ön arıtımı, anaerobik çürütmede metan verimini iyileştirmek için kritik öneme sahiptir (Ge ve ark., 2016).

Gıda atıkları hem endüstriyel gıda işleme atıklarını hem de gıda sektöründen kaynaklanan gıda atıklarını içerir. ABD'de endüstriyel gıda işleme atıkları 2009'da yaklaşık 36,5 milyon tona ulaştı. Gıda atığı, düşük C/N oranları (~ 10) ve düşük pH (4–5) (Brown ve Li, 2013) ile karakterize edilir ve kolayca ara ürünlere dönüştürülebilen yüksek miktarlarda çözünür organik madde içerir. Gıda atıkları temel olarak karbonhidrat, yağ ve proteinden oluşur. Temel bileşimine göre teorik olarak en yüksek metan potansiyeline yağ (1014 L/kg uçucu katı madde), ardından protein (496 L/kg uçucu katı madde) ve karbonhidratlar (415 L/kg uçucu katı madde) sahiptir (Angelidaki ve Sanders, 2004). Bu nedenle, geniş bir biyogaz metan potansiyeli aralığına (245–968 L/kg uçucu katı madde) sahip olan gıda atığı, anaerobik çürütme için substrat olarak iyi bir potansiyele sahiptir (Xu ve ark., 2017).

ABD'de, gıda sektöründen sığır (%83), domuz (%10) ve kanatlı gübresi (%7) dahil olmak üzere yılda 1 milyar tondan fazla hayvan gübresi üretilmektedir (Zhang ve Schroder, 2014). Lignoselülozik biyokütlenin aksine, hayvan gübresi yüksek tampon kapasitesi ve düşük C/N oranları ile karakterize edilir. Hayvan gübresinin biyogaz metan potansiyeli (148-

356 L/kg VS) iyi olduğundan anaerobik çürütme için substrat olarak kullanılabilir.

Biyokatılar olarak bilinen kanalizasyon çamuru, kentsel atıksu arıtma tesislerinden elde edilen bir yan üründür. Hayvan gübresi gibi, kanalizasyon çamuru da düşük C/N oranına ve yüksek tampon kapasitesine sahiptir (Zhang ve ark., 2014b). Birincil çamur esas olarak çözünür yağ ve protein içerdiğinde yüksek bir biyogaz metan potansiyeline (590 L/kg uçucu katı madde) sahiptir (Chynoweth ve ark., 1993). Fakat, arıtma çamurları insan dışkılarından kaynaklanan patojenleri içerdiğinden mezofilik anaerobik çürütme için sorun olabilmektedir (Fu ve ark., 2014; Lu ve ark., 2012).

1.5. İşletme Parametrelerinin Optimizasyonu

Anaerobik çürütmede optimum mikrobiyal bozunma için proses optimizasyonu önemlidir. Anaerobik çürütme; aşılama, sıcaklık, nem, C/N oranı, pH ve havalandırma gibi faktörlerden etkilenir.

Anaerobik çürütmede aşılama, metan verimini artırmak için kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve ticari olarak uygulanmıştır (Yang ve ark. 2015a; Ge ve ark., 2016). Anaerobik çürütme üzerine yapılan araştırmalar, hem mikrobiyal kaynak yönetimine yönelik yaklaşımlara hem de farklı amaçlara odaklanmıştır. Belirli hidrolitik kapasitelere sahip farklı mikroorganizmalar izole edilmiş ve anaerobik çürütücünün performansını artırmak için kullanılmıştır. Önceden seçilmiş selüloolitik mikroorganizmaların eklenmesi metan veriminde %56'lık bir artış sağlamıştır (Martin-Ryals ve ark., 2015).

Anaerobik çürütücüler tipik olarak ısıtma gerektirir ve sıcaklık, anaerobik çürütücüde patojenleri ve sistemin enerji verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Mezofilik çürütmede, çürütülmüş ürünün sterilize edilmemesi ve daha fazla stabilizasyon gerektirmesi sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, patojenleri uzaklaştırmak ve atıksu arıtma tesisi çamurunun stabilizasyonu için termofilik çürütme kullanılabilir (Lin ve ark., 2014). Ayrıca, termofilik çürütme, kompleks organik maddelerin hidrolizini ve biyogaz üretimini arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, anaerobik çürütmede termofilik sıcaklıklar yüksek enerji ihtiyacı gerektirir (Shi ve ark. 2013; Sheets ve ark., 2015a). Uçucu yağ asitlerinin seviyeleri, 6-12 günlerde termofilik çürütücülerde mezofilik çürütücülerden 5 kat daha yüksektir (Shi ve ark. 2013).

Anaerobik çürütme için nem, C/N oranı ve pH önemlidir. Nem, mikrobiyal aktiviteyi korur ve ayrıca anaerobik çürütmede bir kütle transfer ortamı görevi görür (Xu ve ark., 2014a). Nem içeriğinin anaerobik çürütme üzerindeki etkisi, genellikle nem içeriğinin tersi olan toplam katı madde içeriği açısından tartışılır (Xu ve ark., 2014a). Anaerobik çürütücü, %5 ila %35 (%65-95 nem) arasında değişen toplam katı madde içeriği ile çalıştırılabilir (De Baere ve ark., 2012; Li ve ark., 2015;). Daha yüksek bir toplam katı madde içeriği, substrat bazlı metan verimini azaltsa da aynı reaktör hacmine sahip daha fazla substrata izin vererek hacimsel üretkenliğini artırabilir (Brown ve ark., 2012). Anaerobik çürütücüde optimal hacimsel üretkenliği elde etmek için %20-22 katı madde içeriği olması gerekmektedir (Xu ve ark., 2014a; Yang ve Li, 2014).

Karbon (C) ve azot (N), mikrobiyal büyüme için iki temel besin maddesidir; enerji kaynağı olarak karbon, protein ve nükleik asit sentezi için azot kullanılır (Li ve ark., 2011; Kumar, 2011). Yüksek bir C/N oranı biyolojik bozunma oranını düşürürken, düşük bir C/N oranı, anaerobik çürütmede inhibisyona neden olabilecek aşırı amonyak ve uçucu yağ asitleri üretme eğiliminde olacaktır. Anaeroblar, daha düşük mikrobiyal aktiviteleri ve enerji gereksinimleri nedeniyle genellikle aeroblardan daha düşük bir C/N oranı gerektirir (Madigan ve Martinko, 2016). 20-30'luk bir C/N oranı genellikle anaerobik çürütme için optimal olarak kabul edilmiştir (Li ve ark., 2011). Ancak bazı çalışmalar, düşük C/N oranlarını kullanmış (10-20) ve muhtemelen karbonun biyolojik olarak bozunabilirliğinden dolayı iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir (Lin ve ark., 2015).

Pratikte pH genellikle proses sırasında kontrol edilmez, ancak anaerobik çürütmede pH bir göstergedir. Metanojenler pH değişikliklerine daha duyarlıdır, bu nedenle pH anaerobik çürütücülerde iyi izlenmelidir (Xu ve ark., 2013). pH, uçucu yağ asit üretimi ile yakından ilişkilidir ve düşük bir pH (~5), aşırı uçucu yağ asiti üretimine (> 10 g/kg) ve substratlar arasında dengesizliğe neden olur (Xu ve ark., 2013). Ancak bazen yüksek uçucu yağ asidi seviyelerine sahip reaktörler de yüksek tampon kapasitesinden dolayı alkali pH değerleri göstermiştir (Lin ve ark., 2015). Kalsiyum hidroksit gibi alkaliler, gerekirse pH'ı ayarlamak için kullanılabilir. Ayrıca, hidrolitik bakteriler asidik pH'ı (~6.0) tercih ederken (Wang ve ark., 2014), metanojenler nötr veya hafif alkali pH koşullarını (7-8.5) tercih etmektedir (Demirel ve Scherer, 2008).

Mikro havalandırma anaerobik çürütücülerde hidrolizi artırmak için çalışılmıştır (Botheju ve Bakke, 2011). Anaerobik çürütmede sınırlı havalandırma hidrolizi artırabilir, çünkü birçok hidrolitik ve asit oluşturan mikroorganizmalar fakültatifdir. Gerçekten de birkaç

çalışma, anaerobik çürütücülerde kontrollü havalandırmanın metan verimini arttırdığını göstermiştir (Botheju ve Bakke, 2011; Xu ve ark. 2014b). Örneğin, havalandırmasız kıyasla 258 L hava/kg katı madde/gün havalandırma oranı ile daha yüksek uçucu yağ asiti seviyeleri ve metan verimi elde edilmiştir (Xu ve ark. 2014b). Mikro havalandırma, H₂S oluşumunu azaltmak için de test edilmiştir, çünkü H₂S esas olarak anaerobik koşullar altında sülfat indirgeyen bakteriler tarafından üretilir (Nghiem ve ark., 2014). Bununla birlikte, olumsuz etkiler de bildirilmiştir (Zhu ve ark., 2009). Bu değişken sonuçlar, havalandırma hızı, çürütme sıcaklığı, substrat vb. gibi tutarsız çalışma koşullarından kaynaklanabilir. Havalandırma yöntemleride (üst boşlukta veya reaktörlerin altındaki borular aracılığıyla) anaerobik çürütücülerde önemli bir rol oynayabilir (Botheju ve Bakke, 2011).

1.6. Birlikte Çürütme

Farklı atıkların bir araya getirilerek anaerobik çürütücülerde kullanılmıştır. Tipik olarak gıda atığı, hayvan gübresi ve kanalizasyon çamuru N açısından zengin malzemelerdir (C/N=10-20). Lignoselülozik biyokütle ise karbon açısından zengindir (C/N > 50). Birlikte çürütme, C/N oranını, besin maddelerini ve seyreltik inhibitörleri dengelemeyi amaçlar. Örneğin, gıda atıklarını bahçe atıkları ile birlikte çürütülmesi, C/N oranının 17 olmasına ve metan veriminin de %150 oranında artmasına katkı sağlamıştır (Brown ve Li, 2017). Anaerobik çürütmede dengeli koşullar elde etmek için substratların uygun karışım oranları önemlidir. Karıştırma oranlarını optimize etmek için deneysel tasarımlar ve ilgili modeller çalışılmalıdır.

1.7. Substratların Ön Arıtımı

Anaerobik çürütücüde metan verimini artırmak için ön artıma yaygın olarak çalışılmıştır (Tablo 1.3) (Zheng ve ark., 2014; Yang ve ark., 2015a; Lin ve ark., 2018). Lignoselüloz gibi substratlar, özellikle ligninin karmaşık yapısı ve varlığı nedeniyle anaerobik çürütmeye karşı dayanıklıdır. Metan verimini artırmak için, fiziksel (ayırma, öğütme, hidrotermoliz), kimyasal (asit, alkali, ıslak oksidasyon) ve biyolojik (mikroplar) gibi çeşitli ön artıma yöntemleri anaerobik çürütmede kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Substratı mikroorganizmalar için daha erişilebilir hale getirmek için yüzey alanını artıran ve substratların partikül boyutunu azaltan öğütme işlemi, anaerobik çürütme için ticari olarak

mevcuttur (Ponsá ve ark., 2010; Zheng ve ark., 2014). Gelişmiş ülkelerde yaygın olan atıkların kaynaktan ayrılması, boyut küçültmeden önce tavsiye edilir (Ponsá ve ark., 2010). Bununla birlikte, aşırı öğütme yalnızca maliyeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda bozunma verimini de azaltabilir. Çalışmalar, sisal lif atığının partikül boyutunun 100 mm'den 2 mm'ye düşürüldüğünde anaerobik çürütücüdeki metan verimini arttığını, ayçiçek yağı küspesinin partikül boyutunun 2 mm'den 0.355 mm'ye düşürüldüğünde ise metan veriminin azaldığını göstermiştir (De la Rubia ve ark., 2011).

Tablo 1.3. Anaerobik çürütme için ön arıtma yöntemlerinin özeti

Ön arıtma yöntemleri		Anaerobik çürütme
Boyut küçültme	Koşul 0,003–30 mm	Substrat Tarımsal kalıntılar: mısır sapı, buğday samanı, pirinç samanı vb. Orman artıkları: sert ağaç, yumuşak ağaç, vb. Otlar: Miscanthus, Dev kamış, vb. MSW: OFMSW, bahçe süslemeleri, talaşlar, vb.
Sıcak su (hidrotermoliz)	100–230 °C (0,1–2,8 MPa) birkaç dakika	
Seyreltik asit	H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ , H ₃ PO ₄ , organik asitler; %1–4 (g/g TS), birkaç kez 170 °C'ye kadar	
Alkali	NaOH, Ca(OH) ₂ , CaO, KOH ve NH ₃ ·H ₂ O; %1–10 (g/g TS), 170 °C'ye kadar saatlerce veya günlerce	
Islak oksidasyon	0–1.2 MPa O ₂ (H ₂ O ₂); 150–300 °C birkaç dakika	
Mantarlar	Beyaz, kahverengi ve yumuşak çürüklük mantarları ve basidiomycete mantarları, haftalarca 28–37 °C.	

Anaerobik çürütme için hemiselülozu uzaklaştırmak, lignini değiştirmek/degrade etmek ve lignoselülozik biyokütledeki kristal selüloz yapısını parçalamak için hidrotermal, kimyasal ve biyolojik ön arıtma yöntemleri geliştirilmiştir ve her yöntemin güçlü ve zayıf yönleri vardır (Zheng ve ark., 2014). Hidrotermoliz ve asit ön muamelesi hemiselülozu etkili bir şekilde uzaklaştırır ve selülozun mikroorganizmalara karşı erişilebilir yüzey alanını artırır, ancak furfural ve hidroksimetilfurfural (> 5 mM) gibi inhibitörlerin üretilmesi bir

endişe kaynağıdır (Wang ve ark., 2011). Alkali, ıslak oksidasyon ve biyolojik yöntemler lignin gideriminde veya modifikasyonunda etkilidir. Bununla birlikte, alkalilerin kullanılması anaerobik çürütme süreçlerinde, özellikle metanojenizde inhibisyona (örn. sodyum) neden olabilir (Liew ve ark., 2011). Islak oksidasyon, aynı anda lignin, selüloz ve hemiselülozu bozan seçici olmayan bir süreç olduğu için bozunabilir bileşenlerin kaybına neden olabilir (Zheng ve ark., 2014). Bazı mantarlar (örneğin beyaz çürükçül mantarlar) ılıman koşullar altında lignini seçici olarak parçalayabilmelerine rağmen, bir aya kadar uzun bir süreye ihtiyaç duyarlar (Wei ve ark., 2014). Bu zayıflıklar, onları mevcut anaerobik çürütme sistemlerinde tam ölçekli uygulama için olanaksız kılmaktadır.

1.8. Çürütülmüş Ürünün Kullanımı

Çürüme ürünü besin kaynakları veya toprak ıslahı olarak kullanılabilir. Çürüme ürününün nem içeriği, tipik olarak %25-50 katı madde içeren katı bir fraksiyon elde etmek için katı-sıvı ayrımı yoluyla azaltılabilir, bu da taşımayı kolaylaştırır (Möller ve Müller, 2012). Öte yandan, düşük katı madde içeriğine (<%2) sahip olan sıvı fraksiyon, yeniden kullanım veya deşarj için temiz su üretmek üzere ayrıca arıtılabilir.

Çürüme ürünü N, P, K, ağır metaller, patojenler ve antibiyotiklerin içeriğinin yanı sıra stabilite ve olgunluk parametreleri ile karakterize edilebilir (Lin ve ark., 2014; Sheets ve ark., 2015a; Youngquist ve ark., 2016). N-P-K seviyeleri karşılaştırılabilir olmasına rağmen, çürüme ürünü daha fazla amonyak azotu içerir. Amonyak azotunun bitkiler tarafından daha kolay ulaşılabilir olduğu ve organik azotun bitkiler için uzun vadeli bir azot kaynağı olduğu düşünülür (Lin ve ark., 2014). Bu nedenle çürütme ürünü farklı arazi uygulama yöntemleri gerektirebilir. Azot buharlaşmasının azaltılabilmesi için çürütme ürünü uygulaması için derin enjeksiyon tercih edilir (Tiwarı ve ark., 2015). Çürüme ürününün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1.4'te verilmiştir (Lin ve ark., 2014; Guo ve ark., 2014; Sheets ve ark., 2015a; Monlau ve ark., 2015a; Lin ve ark., 2018).

Tablo 1.4. Çürüme ürününün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Parametre	Çürüme ürünü
pH	7,5-8,4
Gübre değeri (% , kuru ağırlık bazında)	
Katı madde	1-24
Uçucu katı madde	38-78
Toplam karbon	31-45
Toplam azot	2,2-15,7
Toplam amonyak azotu	0,6-10,8
P	0,2-6,6
K	0,9-10
Na	0,1-2,5
Mg	0,3-1
Ca	1-5,5
Ağır metal (ppm, kuru ağırlık bazında)	
Ni	25-92
Mn	0-1361
Cu	1-1373
Cr	2-55
Zn	43-3884
As	3,9-29
Se	Tespit edilemedi
Cd	0-10
Hg	<0.1
Pb	0.1-46
Patojen	
Dışkı koliformları	Tespit edilemedi
Olgunluk	
Çimlenme indeksi	70%

Arıtma çamuru söz konusu olduğunda, çürüme suyundaki ağır metallerin konsantrasyonu çoğunlukla ABD ve Avrupa kalite standartlarını sağlar ancak ara sıra yüksek konsantrasyon seviyeleri meydana gelir (Kupper ve ark., 2014). Ağır metaller anaerobik çürütme yoluyla uzaklaştırılmaz ancak hareketlilikleri azaltılabilir. Biyokömürün eklenmesi, anaerobik çürütme sırasında ağır metallerin hareketliliğini de etkili bir şekilde azaltabilir (Chen ve ark., 2012). Termofilik sıcaklıklar, antibiyotiklerin ve antibiyotiğe dirençli bakteri ve genlerin uzaklaştırılmasında mezofilik sıcaklıklardan daha etkili olduğu bulunmuştur (Youngquist ve ark., 2016). Stabilitate ve olgunluk, oksijen alım oranı ve çimlenme indeksi ölçülerek değerlendirilebilir.

Çürüme ürününü değerlendirmek için çeşitli çabalar sarf edilmiştir. Umut verici bir yaklaşım, piroliz yoluyla çürütme ürününden yenilenebilir enerji ve biyokömür üretmektir,

bu sayede malzemeler sentez gazı (ör. H₂, CO ve CH₄), biyo-yağ (ör. Şekerler, ketonlar ve fenoller) ve biyokömür üretmek için sınırlı bir oksijen koşulu altında ısıtılır (300-1000 °C). Çürüme ürününden üretilen sentez gazının düşük ısı değeri yaklaşık 11 MJ/m³'tür (Li ve ark., 2014). Çürüme ürününden üretilen biyo-yağ, daha yüksek lignin içeriğine sahiptir (Liang ve ark., 2015). Biyokömür, atıksudan fosfor ve ağır metalleri uzaklaştırmak için bir yakıt veya bir absorbent olarak kullanılabilir (Yao ve ark., 2011; Inyang ve ark., 2012; Monlau ve ark., 2015a).

1.9. Çevresel Etkiler ve Kirlilik Azaltma Stratejileri

Anaerobik çürütmenin atık arıtma için birçok avantajı olmasına rağmen, esas olarak koku (NH₃, H₂S, uçucu organik bileşikler (VOC'ler)) ve sera gazı (GHG) emisyonlarını (CH₄, N₂O) içeren çevresel kaygılar da mevcuttur.

Anaerobik çürütme için emisyonlar esas olarak uygun olmayan şekilde depolanan veya araziye uygulanan çürüme ürünündeki organik kalıntılardan kaynaklanmaktadır (Tablo 1.5). Hayvan gübresi, enerji bitkileri ve endüstriyel gıda atıklarından elde edilen CH₄ potansiyellerinin, toplam CH₄ üretiminin %5-31'ini oluşturan 180 günlük depolama sırasında 2.88-37.6 L/kg VS olduğu bildirilmiştir (Tiwarı ve ark., 2015). Çürüme ürününün arazi uygulamasından kaynaklanan emisyonlar arazi uygulama yöntemlerinden oldukça etkilenir. Örneğin, çürütücü maddenin yüzeye uygulanması, ilk hafta boyunca önemli NH₃ buharlaşmasına (başlangıçtaki toplam amonyak azotunun %65'i) neden olabilir (Tiwarı ve ark., 2015).

Tablo 1.5. Anaerobik çürütücü için emisyon kaynağı ve azaltma stratejileri

Emisyon kaynağı	Emisyon miktar tayini	Azaltma stratejileri
Anaerobik çürütme	Üretilen toplam CH ₄ 'ün %0,4-2.4'ü	Yakma
Biyogaz kullanımı	Üretilen toplam CH ₄ 'ün %0,2-11'i	Kapalı depolama
Çürüme ürününün depolanması	Yöntemlere bağlıdır	Kompostlaştırmaya bakın
Arıtma sonrası		Sindirim enjeksiyonu;
Arazi uygulaması	İlk TAN'ın %65'i NH ₃ olarak kayboldu; %10 ilk TAN NO ₂ olarak kaybedildi; CH ₄ ve N ₂ O'nun küçük emisyonları	tarımsal en iyi yönetim uygulamaları

Anaerobik çürütücüden kaynaklanan sera gazı emisyonları, uygun işlemler ve çürütücü maddenin son işlemleri ile en aza indirilebilir (Tablo 1.5). Biyogaz tesisleri için çürütücü maddenin kapalı şekilde depolanması tavsiye edilir ve emisyonları yaklaşık 20 kg CO₂-eq/ton biyoatık kadar azalttığı rapor edilmiştir (Daniel-Gromke ve ark., 2015). Ek olarak, kombine ısı ve güç ünitesinde kullanılmayan fazla biyogaz yakılmalıdır. Çürüme ürünü arazi uygulamasından kaynaklanan emisyonları en aza indirmek için, NH₃ (%85'e kadar) ve NO₂ (>%95) emisyonlarını önemli ölçüde azalttığından, çürüme ürününün enjeksiyonu ve toprağa dahil edilmesi yüzey uygulamasına tercih edilir (Tiwary ve ark., 2015). Enjeksiyondan bir hafta sonra, esas olarak yüzey altı anaerobik koşullar nedeniyle sera gazı emisyonlarında artış meydana gelebilir. Benzer şekilde, çürüme ürününün sıvı fraksiyonunun uygulanması da yüksek toprak infiltrasyonunun bir sonucu olarak N₂O emisyonlarında bir artış gösterebilir (Möller ve Stinner, 2009). Bu nedenle, toprak havalandırmasını artıracak tarımsal uygulamalar enjeksiyondan bir hafta sonra yapılmalıdır (Nkoa, 2014).

2. MATERİYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında çalışma alanı olarak Malatya ilinde bulunan bir biyogaz tesisi seçildi (Şekil 2.1). Biyogaz tesisi, atıkların dökülüp homojen hale getirildiği bir dengeleme havuzuna ve atıkların çürütüldüğü fermantasyon ünitesine sahiptir. Fermantasyon işleminin gerçekleşmesi için 2 adet reaktör bulunmaktadır. Reaktörlerin üst kısmında çift kat gaz toplama membranları yer almaktadır. Fermantasyon sonucu oluşan ürünün işlendiği 2 adet separatör tesiste mevcuttur. Gaz toplama ünitesinden alınan biyogaz nem tutucudan geçirilerek suyu alınmakta ve yakma suretiyle enerjiye dönüştürülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında biyogaz tesisinin verimini değerlendirmek için fermantasyon işleminin gerçekleştirildiği 2 adet reaktöre ait pH, sıcaklık, katı madde (KM), organik katı madde (OKM) değerleri aylık olarak hesaplandı ve oluşan metan (CH_4), hidrojen sülfür (H_2S) ve oksijen (O_2) değerleri araştırıldı. Ayrıca, biyogaz üretimi sonucu oluşan gübrelerde bazı metaller/elementler de tespit edildi. pH ve sıcaklık ölçümleri WTW marka pH 3110 kullanılarak, katı madde ve organik katı madde ölçümleri standart metotlara göre, CH_4 , H_2S ve O_2 değerleri Geotech-Biogaz 5000 cihazı kullanılarak, gübrelerde bulunan metal/elementler ise ICP-MS kullanılarak belirlendi.



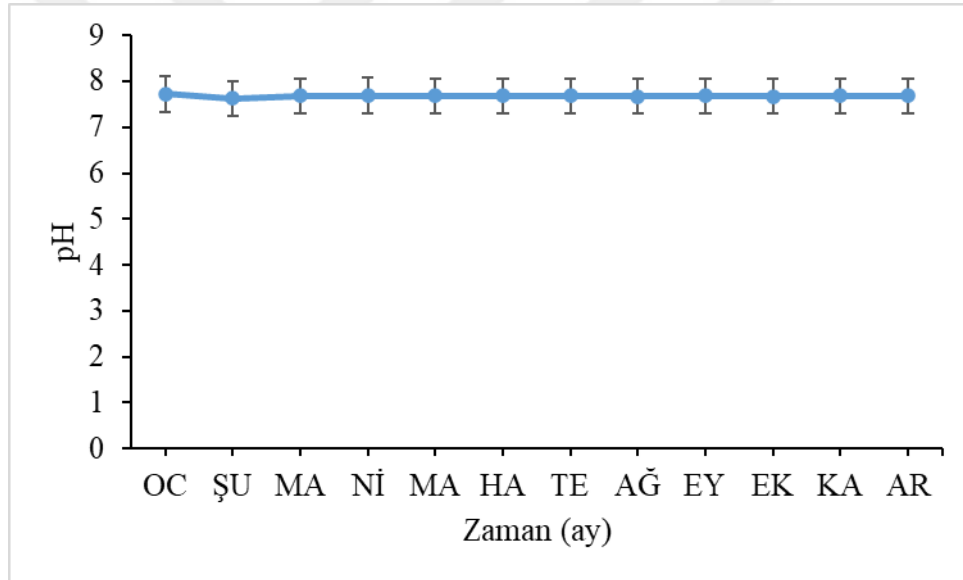
Şekil. 2.1. Biyogaz tesisi, numune alımı ve gaz ölçümleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında seçilen biyogaz tesisinde iki adet çürütücü bulunmaktadır. Bu nedenle, her bir çürütücüye ait pH, sıcaklık, KM ve OKM değerleri ayrı ayrı değerlendirildi ve tartışıldı. Çürütücülerden elde edilen veriler değerlendirilerek biyogaz tesisinde oluşan metan, hidrojen sülfür ve oksijen değerleri de tespit edildi.

3.1. Birinci Çürütücü

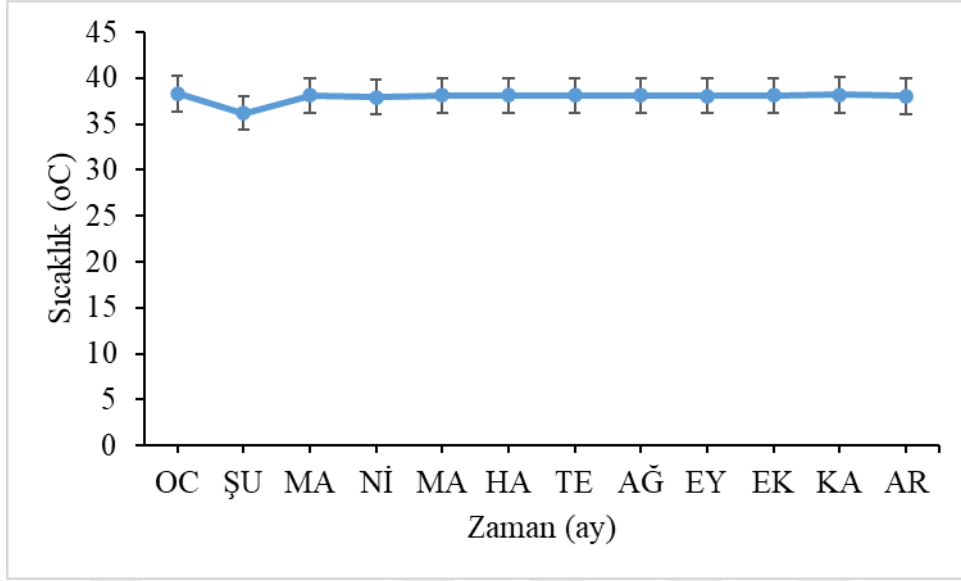
Biyogaz tesisinde bulunan birinci çürütücüye ait pH değerleri Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Birinci çürütücüye ait pH değerleri

Şekil 3.1. değerlendirildiğinde birinci çürütücüye ait pH değerlerinin 7,63 ila 7,72 arasında değiştiği belirlendi. En düşük pH değeri Şubat ayında en yüksek pH değeri ise Ocak ayında tespit edildi. Aylara göre pH değerleri fazla değişkenlik göstermedi. Aylara göre pH değerleri Şubat < Ekim < Ağustos < Mart = Aralık = Eylül = Mayıs = Haziran = Kasım = Temmuz < Nisan < Ocak şeklide sıralandı.

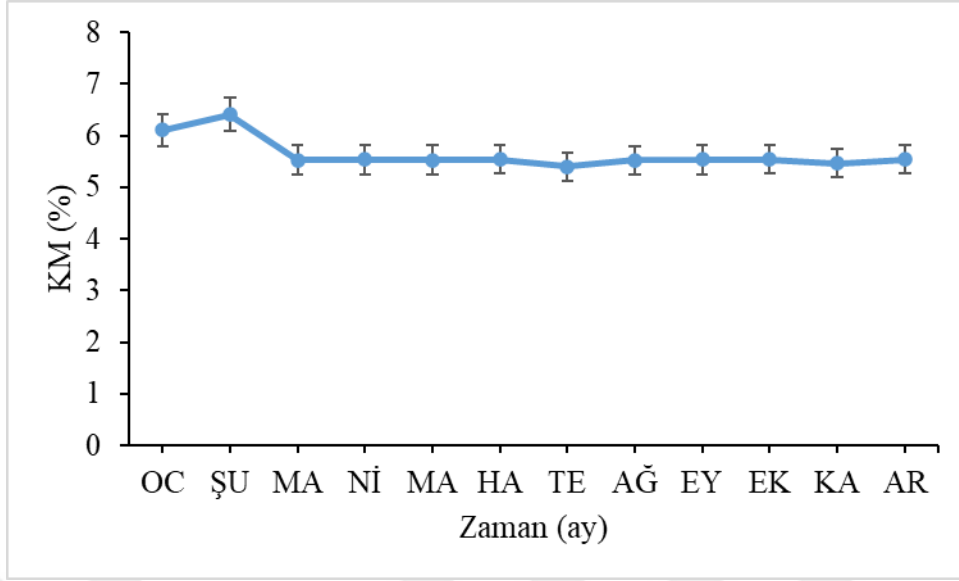
Biyogaz tesisinde bulunan birinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Birinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri

Şekil 3.2. değerlendirildiğinde sıcaklık değerlerinin 36,21 °C ila 38,32 °C arasında değiştiği belirlendi. En yüksek sıcaklık değeri Ocak ayında, en düşük sıcaklık değeri ise Şubat ayında tespit edildi. Reaktör içerisindeki sıcaklık mevsimsel şartlara göre ve ısıtma da kullanılan ekipmanların çalışma rutinine göre değişiklik göstermektedir. Biyolojik aktivite de dikkate alınarak ekipmanların bakımları zamanında yapılmış dolayısıyla sıcaklık değerlerinde fazla değişiklik gözlemlenmemiştir. Aylara göre sıcaklık değerleri Şubat<Nisan<Aralık<Eylül<Mayıs=Haziran<Mart<Ekim<Temmuz<Ağustos<Kasım<Ocak şeklinde sıralandı.

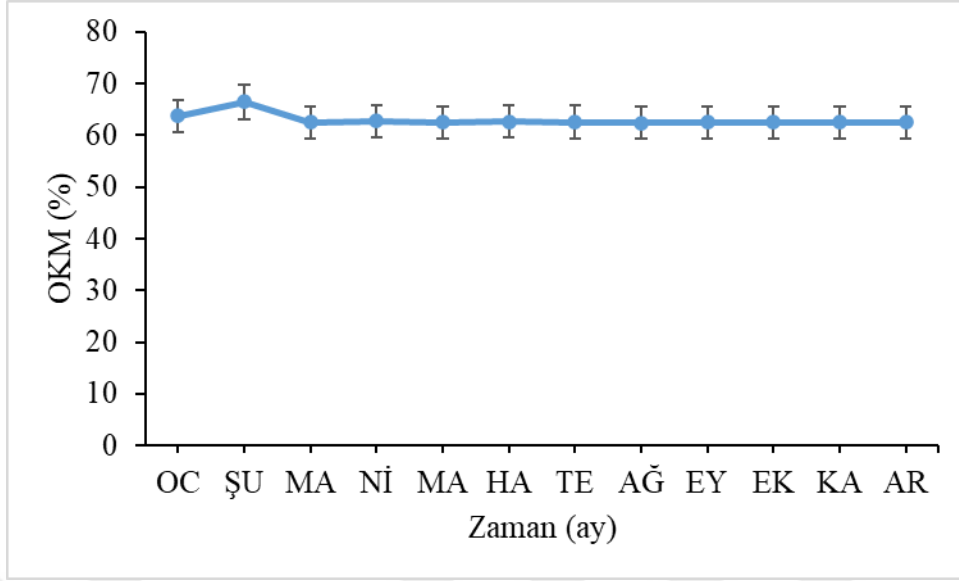
Biyogaz tesisinde bulunan birinci çürütücüye ait katı madde değerleri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Birinci çürütücüye ait katı madde değerleri

Katı madde içeriği temelinde reaktöre beslenen atığın karakteri ile ilgilidir. Tesiste ürün olarak ağırlıklı hayvan gübresi kullanılmıştır. Kış aylarında hayvanların kapalı ortamda olması dolayısıyla gübre kaybının az olduğu ve kalitesinin yüksek olduğu bilinmektedir. Şekil 3.3. değerlendirildiğinde katı madde değerleri %5,40-6,40 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek katı madde değeri Şubat ayında tespit edilirken en düşük katı madde değeri Temmuz ayında tespit edildi. Aylara göre katı madde değerleri Temmuz<Kasım<Ağustos<Mart=Mayıs=Eylül=Nisan<Haziran=Aralık=Ekim<Ocak<Şubat şeklinde sıralandı.

Biyogaz tesisinde bulunan birinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri Şekil 3.4'te verilmiştir.

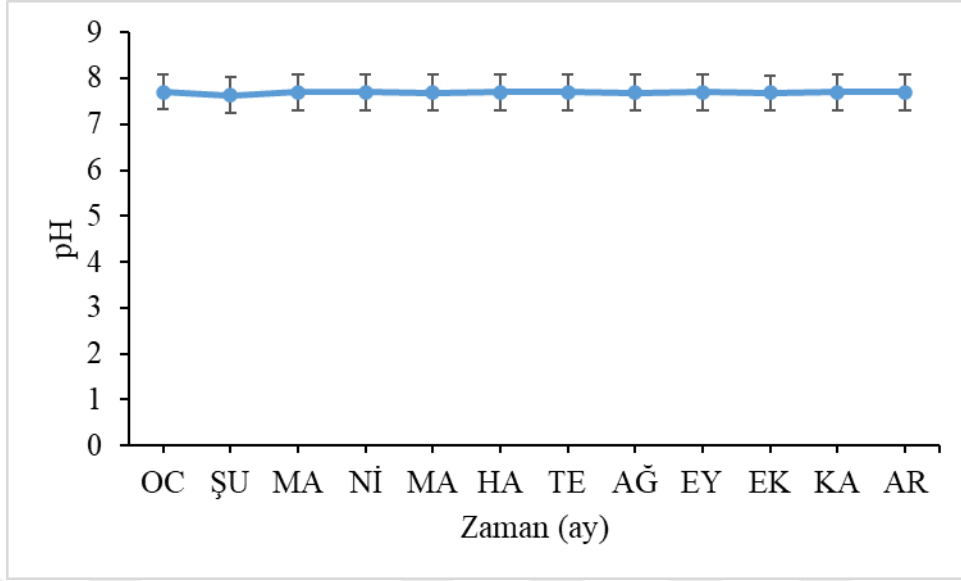


Şekil 3.4. Birinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri

Organik katı madde içeriği, üretimin bir önceki adımında hesaplanan katı madde içeriğinin ne kadarının organik olduğunun belirlenmesidir. Organik katı madde içeriğinin değişimi mevsimsel değişimler ve gübrenin toplanma metoduna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.4 değerlendirildiğinde organik katı madde değerlerinin %62,46-66,50 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek organik katı madde değeri Şubat ayında, en düşük organik katı madde değeri Ağustos ayında tespit edildi. Aylara göre organik katı madde değerleri Ağustos<Kasım<Mart<Aralık<Ekim<Mayıs<Eylül<Temmuz<Haziran<Nisan<Ocak<Şubat şeklinde sıralandı.

3.2. İkinci Çürütücü

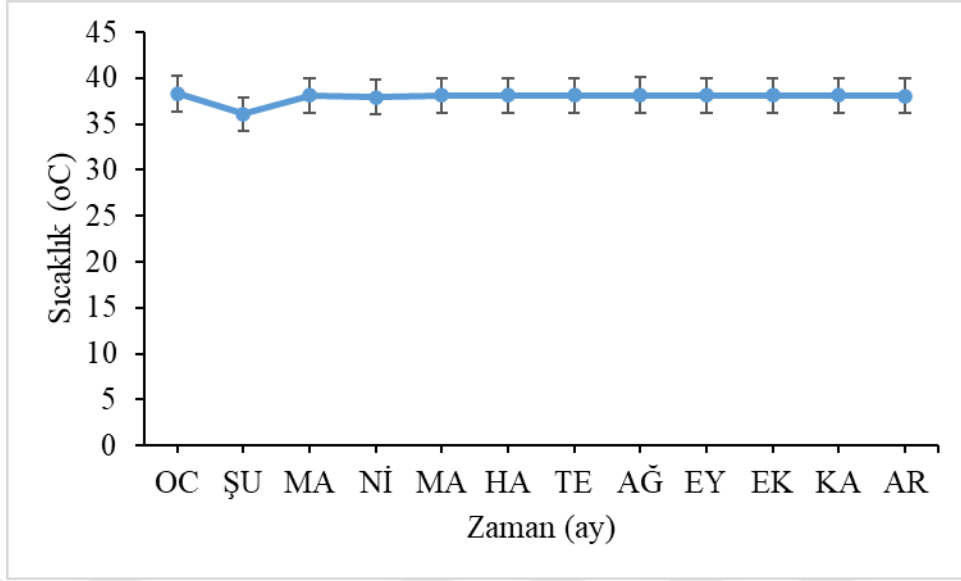
Biyogaz tesisinde bulunan ikinci çürütücüye ait pH değerleri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. İkinci çürütücüye ait pH değerleri

Şekil 3.5. değerlendirildiğinde ikinci çürütücüye ait pH değerlerinin 7,63 ila 7,70 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek pH değeri Ocak ayında tespit edilirken en düşük pH değeri Şubat ayında tespit edildi. Aylara göre pH değerleri fazla değişkenlik göstermedi. İkinci çürütücüye ait pH değerindeki değişikliklerin minimal olmasının nedeni fermentasyon için tesise getirilen atığın karakterindeki değişikliğin az olmasından kaynaklanmaktadır. Aylara göre pH değerleri Şubat < Ekim < Ağustos = Mart = Eylül = Mayıs = Haziran = Kasım = Temmuz = Aralık < Nisan < Ocak şeklinde sıralandı.

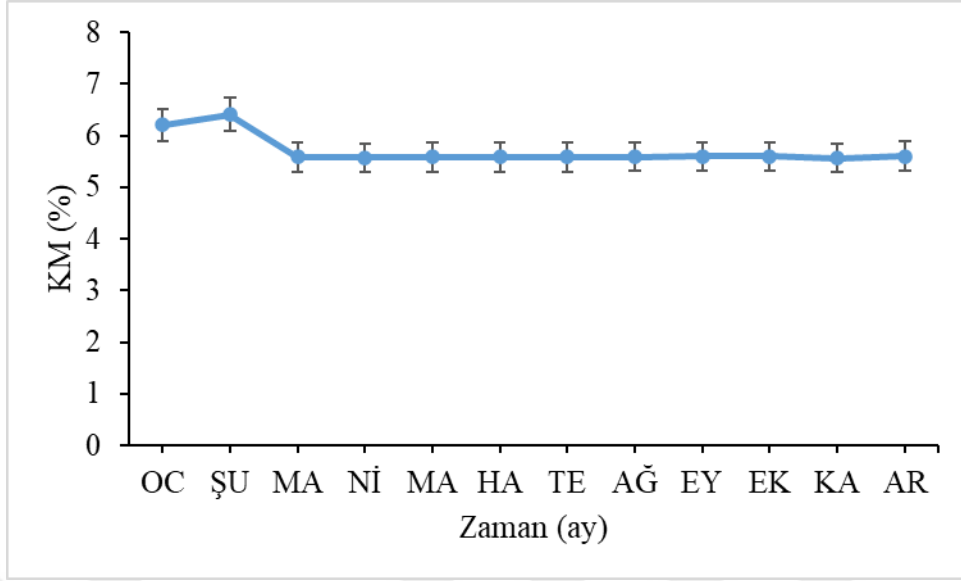
Biyogaz tesisinde bulunan ikinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. İkinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri

Şekil 3.6. değerlendirildiğinde ikinci çürütücüye ait sıcaklık değerlerinin 36,09-38,32 °C arasında değiştiği belirlendi. En yüksek sıcaklık değeri Ocak ayında, en düşük sıcaklık değeri ise Şubat ayında belirlendi. Bu değerler biyolojik aktivite, mevsimsel değişimler ve ısıtmada kullanılan ekipmanlara bağlı olarak değişmektedir. Şubat ayındaki sıcaklık değerinin düşme nedeni o dönemdeki hava sıcaklığının düşmesinden kaynaklanmıştır. Aylara göre sıcaklık değerleri Şubat < Nisan < Aralık < Eylül = Haziran < Ekim = Mayıs < Mart < Temmuz < Kasım < Ağustos < Ocak şeklinde sıralandı.

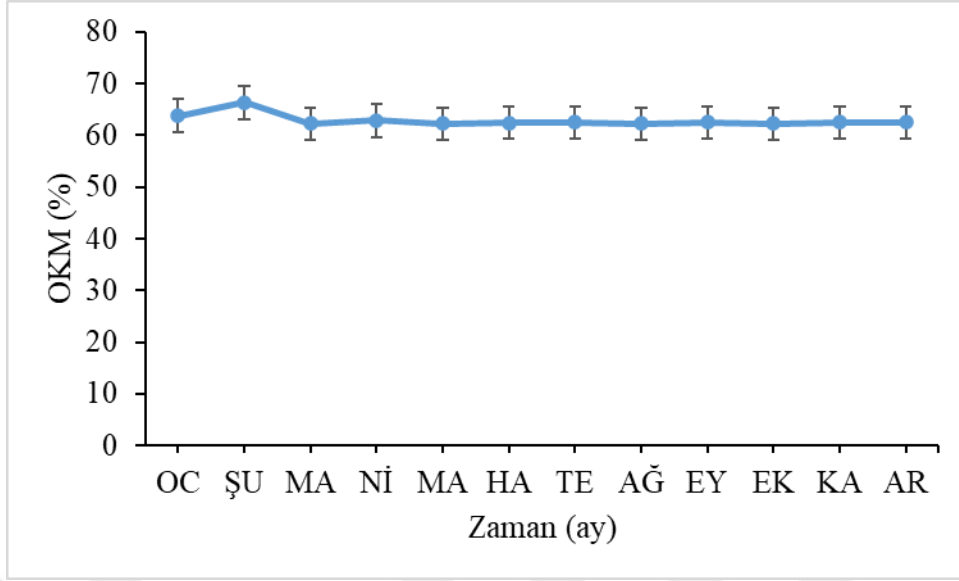
Biyogaz tesisinde bulunan ikinci çürütücüye ait katı madde değerleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. İkinci çürütücüye ait katı madde değerleri

Şekil 3.7. değerlendirildiğinde katı madde değerlerinin %5,56-6,40 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek katı madde değeri Şubat ayında, en düşük katı madde değeri Kasım ayında tespit edildi. Katı madde değerlerinin stabil olmaması ve belirli zamanlarda artış ya da azalış göstermesi tesiste hammadde olarak kullanılan hayvan gübresinden kaynaklanabilir. Aylara göre katı madde değerleri Kasım<Nisan<Haziran=Temmuz<Mart=Mayıs=Ağustos=Eylül<Ekim=Aralık<Ocak<Şubat şeklinde sıralandı.

Biyogaz tesisinde bulunan ikinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. İkinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri

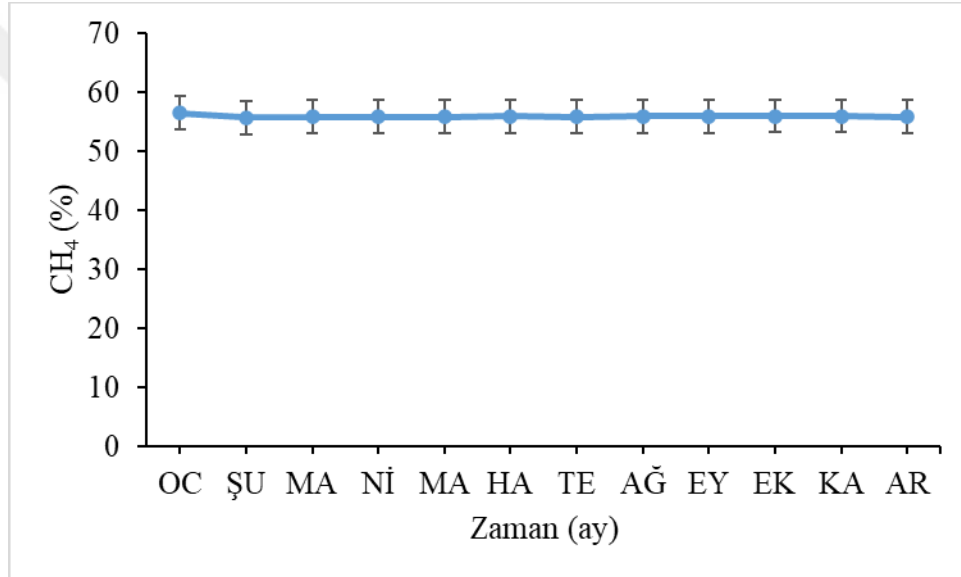
Sisteme katı madde yüklemesi yapılırken yüklenen katı maddenin organik içeriğinin bilinmesi ve yüzde olarak yüksek olması gerekir aksi takdirde biyogaz oluşumu olumsuz yönde etkilenir. Organik katı maddenin yüzde olarak değişimi mevsimlere ve kaynağından alınan ürünün toplama boşaltma ve yabancı maddelere karşı izolasyonuna bağlıdır. Şekil 3.8 değerlendirildiğinde organik katı madde değerlerinin %62,27-66,35 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek organik katı madde değeri Şubat ayında, en düşük organik katı madde değeri Mart ve Mayıs ayında belirlendi. Aylara göre organik katı madde değerleri Mart=Mayıs<Ağustos<Ekim<Haziran<Eylül<Temmuz=Aralık<Kasım<Nisan<Ocak<Şubat şeklinde sıralandı.

3.3. Biyogazın Değerlendirilmesi

Biyogaz tesisinde elde edilen gübreler toprak iyileştirici madde olarak tesisteki yeşil alanlarda kullanılmakta, büyükşehir belediyesi park bahçeler müdürlüğüne ve hayvansal atık alınan çiftliklere gönderilerek gübre olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, biyogaz tesisinden elde edilen gübrenin element içeriğinin belirlenmesi önemlidir. Bu kapsamda, tez çalışmamızda biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde bazı element analizleri gerçekleştirildi. Bu çerçevede, 15 günde bir alınan gübre örneklerinde berilyum (Be), sodyum (Na), alüminyum (Al), potasyum (K), kalsiyum (Ca), molibden (Mo), baryum (Ba)

ve bor (B) elementleri tespit edilirken gümüş (Ag), talyum (Tl) ve bizmut (Bi) elementleri tespit edilemedi. Ortalama Be konsantrasyonu 3,475 mg/kg, ortalama Na konsantrasyonu 3340 mg/kg, ortalama Al konsantrasyonu 1174 mg/kg, ortalama K konsantrasyonu 21187 mg/kg, ortalama Ca konsantrasyonu 49067 mg/kg, ortalama Mo konsantrasyonu 2,17 mg/kg, ortalama Ba konsantrasyonu 44,98 mg/kg ve ortalama B konsantrasyonu 47,37 mg/kg olarak tespit edildi. Bu tez kapsamında fermentasyon sonucu birinci ve ikinci çürütücüden gelen biyogazın gaz değerleri incelenmiştir.

Birinci ve ikinci çürütücüden gelen biyogazın karışması sonucu oluşan biyogazın metan değerleri Şekil 3.9’da verilmiştir.

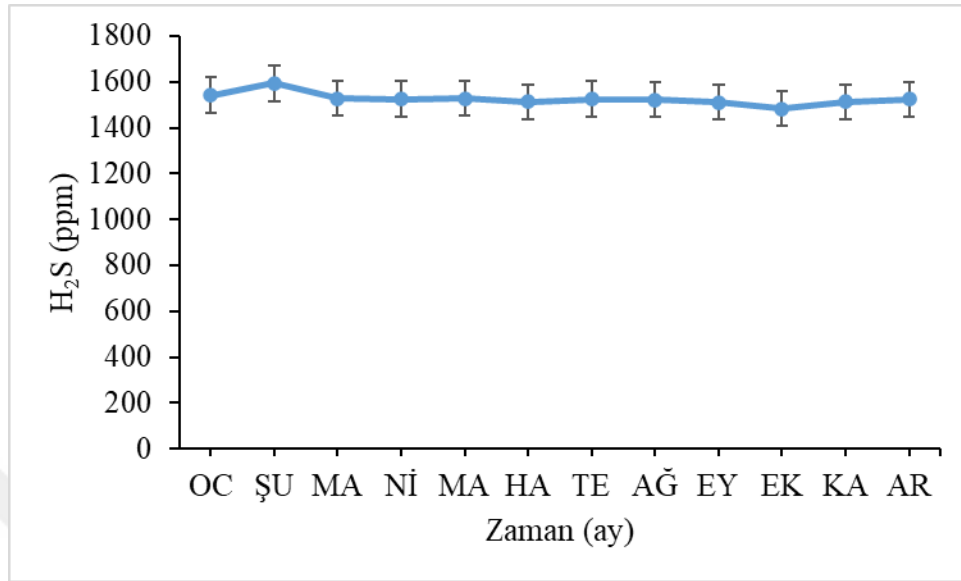


Şekil 3.9. Biyogaz tesisinin CH₄ değerleri

Biyogazın içerisindeki metan oranı bakteri kültürüne, bakterinin yaşam koşullarına (pH, sıcaklık, besleme sıklığı) bağlı olarak değişim gösterir. Şekil 3.9 değerlendirildiğinde biyogazdaki metan oranı en yüksek Ocak ayında %56,49 olarak en düşük metan oranı ise Şubat ayında %55,72 olarak tespit edildi. Söz konusu tesiste bakteri yaşam koşullarının değişiklik göstermediği gözlemlenmiş olup buna bağlı olarak metan değerleri de fazla değişiklik göstermemiştir. Aylara göre oluşan metan gazı değerleri Şubat<Mart=Mayıs=Aralık<Temmuz<Nisan<Eylül=Haziran<Ağustos<Ekim<Kasım<Ocak şeklinde sıralandı.

Birinci ve ikinci çürütücüden gelen biyogazın karışması sonucu oluşan biyogazın

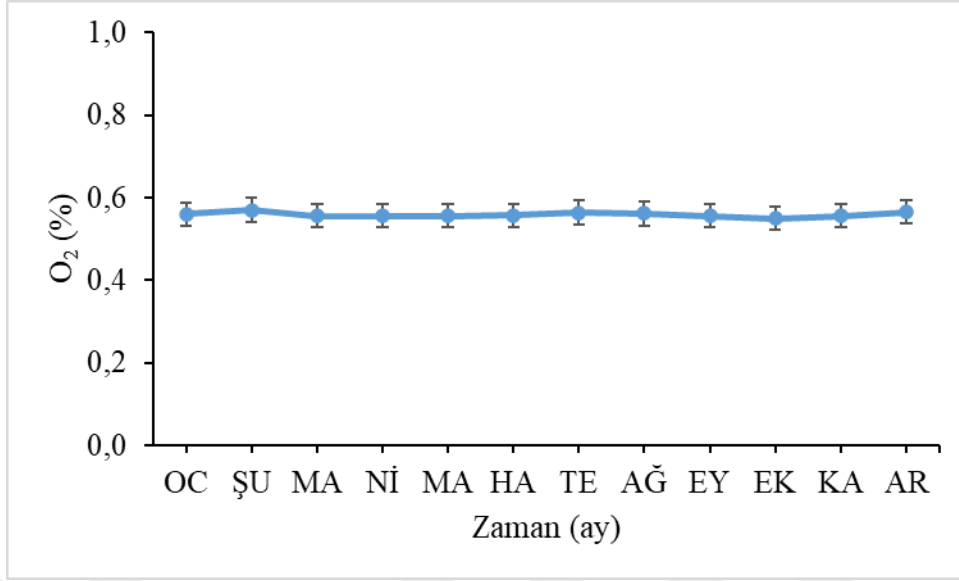
H₂S değerleri Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Biyogaz tesisinin H₂S değerleri

Şekil 3.10’a göre tesisten elde edilen H₂S değeri en yüksek şubat ayında 1593 ppm olarak en düşük H₂S değeri Ekim ayında 1483,07 ppm olarak belirlendi. Biyogaz retim tesislerinde H₂S’in oluşmasındaki en temel faktör tavuk gbresidir. Tesisin aylara göre H₂S değerleri değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenliğin ana sebebi tesiste kullanılan tavuk gübresinin parçalanmasından kaynaklanmaktadır. Tavuk gübresini miktarı arttıka H₂S miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Tesise alınan tavuk gübresini miktarı ile H₂S değeri ile doğru orantılıdır. Aylara göre biyogaz tesisinin hidrojen sülfür değerleri Ekim<Eylül<Haziran<Kasım<Ağustos<Aralık<Temmuz<Nisan<Mart=Mayıs<Ocak<şubat şeklinde sıralandı.

Birinci ve ikinci rrtcden gelen biyogazın karışması sonucu oluşan biyogazın O₂ değerleri Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Biyogaz tesisinin O₂ değerleri

Biyogaz üretim tesislerinde gaz toplama balonlarına belirli miktarda O₂ sürekli olarak verilir. Bunun temel nedeni gaz temizlemedir. Bu temizliğin temel prensibi biyogazın içerisindeki istenmeyen bileşiklerle O₂'nin tepkimeye girmesini sağlayarak çökelek oluşturmaktır. Şekil 3.11. değerlendirildiğinde tesisin oksijen değerlerinin %0,56-0,57 arasında değiştiği belirlendi. En yüksek oksijen değeri Şubat ve Aralık aylarında tespit edilirken diğer aylarda ise en düşük oksijen yüzdeleri elde edildi. Bu tez çalışmasında incelenen biyogaz tesisinde besleme ve atık verilerinde çok fazla bir değişkenlik olmadığı için sistemde bulunan O₂ miktarı da çok fazla değişiklik göstermedi. Aylara göre biyogaz tesisinin oksijen değerleri Ekim = Mart = Nisan = Mayıs = Eylül = Kasım = Haziran = Ocak = Ağustos = Temmuz < Aralık = Şubat şeklinde sıralandı.

3.4. Biyogaz Tesisinden Elde Edilen Gübrenin Element İçeriği

Biyogaz tesisinde elde edilen gübreler toprak iyileştirici madde olarak tesisteki yeşil alanlarda kullanılmakta, büyükşehir belediyesi park bahçeler müdürlüğüne ve hayvansal atık alınan çiftliklere gönderilerek gübre olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, biyogaz tesisinden elde edilen gübrenin element içeriğinin belirlenmesi önemlidir. Bu kapsamda, tez çalışmamızda biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde bazı element analizleri gerçekleştirildi. Bu çerçevede, 15 günde bir alınan gübre örneklerinde berilyum (Be),

sodyum (Na), alüminyum (Al), potasyum (K), kalsiyum (Ca), molibden (Mo), baryum (Ba) ve bor (B) elementleri tespit edilirken gümüş (Ag), talyum (Tl) ve bizmut (Bi) elementleri tespit edilemedi. Ortalama Be konsantrasyonu 3,475 mg/kg, ortalama Na konsantrasyonu 3340 mg/kg, ortalama Al konsantrasyonu 1174 mg/kg, ortalama K konsantrasyonu 21187 mg/kg, ortalama Ca konsantrasyonu 49067 mg/kg, ortalama Mo konsantrasyonu 2,17 mg/kg, ortalama Ba konsantrasyonu 44,98 mg/kg ve ortalama B konsantrasyonu 47,37 mg/kg olarak tespit edildi.



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Malatya ilinde bulunan biyogaz tesisinde iki çürütücüye ait pH, sıcaklık, KM, OKM verileri ile çürütücülerden elde edilen CH₄, H₂S ve O₂ verileri değerlendirildi. Bu çerçevede, bu tez kapsamında aşağıda verilen sonuçlar elde edildi.

a-) Aylara göre birinci çürütücüye ait pH değerleri 7,63 ila 7,72 arasında değişirken ikinci çürütücüye ait pH değerlerinin ise 7,63-7,70 arasında değiştiği belirlendi. Hem birinci çürütücüdeki pH değerleri hem de ikinci çürütücüdeki pH değerleri birbirine benzerdi. Her iki çürütücü için en yüksek pH değerleri Ocak ayında, en düşük pH değerleri Şubat ayında tespit edildi.

b-) Aylara göre birinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri 36,21-38,32 °C arasında ikinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri ise 36,09-38,32 °C arasında değiştiği belirlendi. Birinci ve ikinci çürütücüye ait sıcaklık değerleri birbirine benzerdi. Her iki çürütücü için en yüksek sıcaklık değerleri Ocak ayında, en düşük sıcaklık değerleri Şubat ayında tespit edildi.

c-) Aylara göre birinci çürütücüye ait katı madde değerleri %5,56-6,40 arasında ikinci çürütücüye ait katı madde değerleri ise %5,40-6,40 arasında değiştiği belirlendi. Birinci ve ikinci çürütücüye ait katı madde değerleri birbirine benzerdi. Birinci çürütücü ve ikinci çürütücü için en yüksek katı madde değerleri Şubat ayında, en düşük katı madde değerleri birinci çürütücü için Temmuz ayında, ikinci çürütücü için Kasım ayında tespit edildi.

d-) Aylara göre birinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri %62,46-66,50 arasında ikinci çürütücüye ait katı madde değerleri ise %62,27-66,35 arasında değiştiği belirlendi. Birinci ve ikinci çürütücüye ait organik katı madde değerleri birbirine benzerdi. Birinci ve ikinci çürütücü için en yüksek organik katı madde değerleri Şubat ayında, en düşük organik katı madde değerleri birinci çürütücü için Ağustos ayında, ikinci çürütücü için Mart ve Mayıs aylarında tespit edildi.

e-) Aylara göre biyogaz tesisinde elde edilen en yüksek metan oranı %56,49 olarak Ocak ayında, en düşük metan oranı ise %55,72 olarak Şubat ayında gerçekleşti.

f-) Aylara göre biyogaz tesisinde en yüksek hidrojen sülfür değeri 1593 ppm olarak Şubat ayında, en düşük hidrojen sülfür değeri 1483,07 ppm olarak Ekim ayında gerçekleşti.

g-) Aylara göre biyogaz tesisinde gaz toplama balonlarındaki oksijen seviyesi %0,56-0,57 seviyelerinde gözlemlendi.

h-) Biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde element içerikleri incelendiğinde en

yüksek konsantrasyon kalsiyum için belirlenirken en düşük konsantrasyon molibden elementi için tespit edildi. Gübrenin ortalama kalsiyum konsantrasyonu 49067 mg/kg olarak, ortalama molibden konsantrasyonu 2,17 mg/kg olarak belirlendi.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasıyla bir biyogaz tesisinin işletilmesinde göz önünde bulundurulması gereken bazı parametreler değerlendirildi ve gaz üretim yüzdeleri hesaplanarak biyogaz tesisinin verimi ortaya çıkartıldı. Ayrıca, biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerin element içeriği de ortaya konuldu. Elde edilen veriler incelendiğinde birinci ve ikinci çürütücünün benzer analiz sonuçları verdiği görüldü. Analiz sonuçlarına göre her iki çürütücünün de performansının iyi olduğu gözlemlendi. Bu durum, her iki çürütücünün de stabil olarak işletildiğini ortaya koydu. Aynı zamanda, biyogaz tesisinin metan içeriği incelendiğinde metan oranının %55-56 civarında olduğu gözlemlendi. Bu durum, biyogaz tesisinde iyi bir metan gazı oluşumunu ve tesisin verimli bir şekilde çalıştığını gösterdi. Ancak, metan gazı üretiminin %60'ın üzerine çıkarılması için bazı öneriler dikkate alınabilir. Bunlar; tesise alınan atıkların özelliklerinde değişikliğe gidilmesi, tesisi besleme şartlarının değiştirilmesi ve çürütücülerdeki bazı parametrelerin değiştirilmesi şeklinde sıralanabilir. Ayrıca, biyogaz tesisinden elde edilen gübrelerde tesis tarafından tüm element analizleri de gerçekleştirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Angelidaki, I., Sanders, W.,** 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Rev Environ Sci Bio/Technol.* 3: 117-129.
- Balan, V.,** 2014. Current challenges in commercially producing biofuels from lignocellulosic biomass. *ISRN Biotechnol.* 2014: 1-31.
- Botheju, D., Bakke, R.,** 2011. Oxygen effects in anaerobic digestion - a review. *Open Waste Manag J.* 4: 1-19.
- Bhat, P.R., Chanakya, H.N., Ravindranath, N.H.,** 2001. Biogas plant dissemination. *Journal of Energy Sustainable Development,* 1:39-41.
- Brown, D., Li, Y.,** 2013. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste for biogas production. *Bioresour Technol.* 127: 275-280.
- Brown, D., Shi, J., Li, Y.,** 2012. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresour Technol.* 124: 379-386.
- Chen, H., Yan, S., Ye, Z., Meng, H., Zhu, Y.,** 2012. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives. *Environ Sci Pollut Res.* 19: 1454-1463.
- Chynoweth, D., Turick, C., Owens, J.,** 1993. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass- Bioenergy.* 5: 95-111.
- Daniel-Gromke, J., Liebetrau, J., Denysenko, V., Krebs, C.,** 2015. Digestion of bio-waste - GHG emissions and mitigation potential. *Energy Sustain Soc.* 5: 1-12.
- De Baere, L., Mattheeuws, B.,** 2012. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe. *Waste Manag.* 3: 517-526.
- De la Rubia, M.A., Fernández-Cegri, V., Raposo, F., Borja, R.,** 2011. Influence of particle size and chemical composition on the performance and kinetics of anaerobic digestion process of sunflower oil cake in batch mode. *Biochem Eng J.* 58-59: 162-167.
- Demirel, B., Scherer, P.,** 2008. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 7: 173-190.
- Fu, B., Jiang, Q., Liu, H., Liu, H.,** 2014. Occurrence and reactivation of viable but non-culturable *E. coli* in sewage sludge after mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. *Biotechnol Lett.* 36: 273-279.
- Ge, X., Xu, F., Li, Y.,** 2016. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: recent progress and perspectives. *Bioresour Technol.* 205: 239-249.

- Ge, X., Yang, L., Sheets, J.P., Yu, Z., Li, Y.,** 2014. Biological conversion of methane to liquid fuels: status and opportunities. *Biotechnol AÇv.* 32: 1460-1475.
- Guo, X., Wang, C., Sun, F., Zhu, W., Wu, W.,** 2014. A comparison of microbial characteristics between the thermophilic and mesophilic anaerobic digesters exposed to elevated food waste loAÇings. *Bioresour Technol.* 152: 420-428.
- Holm-Nielsen, J.B., Al SeAÇi, T., Oleskowicz-Popiel, P.,** 2009. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresour Technol.* 100: 5478-5484.
- Hosseini Koupaie, E., Barrantes Leiva, M., Eskicioglu, C., Dutil, C.,** 2014. Mesophilic batch anaerobic co-digestion of fruit-juice industrial waste and municipal waste sludge: process and cost-benefit analysis. *Bioresour Technol.* 152: 66-73.
- Inyang, M., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A.R., Pullammanappallil, P., Cao, X.,** 2012. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. *Bioresour Technol.* 110: 50-56.
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A.,** 2002. Renewable energy and sustainable development in Turkey. *Renewable Energy.* 25:431-453.
- Kim, H.,** 2014. Decision-making in the selection of food waste diversion systems for Boone, North Carolina: comparing composting and anaerobic digestion by life cycle assessment and cost benefit analysis. Yüksek Lisans Tezi, Appalachian State University, ABD, 108s.
- Kumar, S.,** 2011. Composting of municipal solid waste. *Crit Rev Biotechnol.* 31: 112-136.
- Kupper, T., Burge, D., Bachmann, H.J., Gusewell, S., Mayer, J.,** 2014. Heavy metals in source-separated compost and digestates. *Waste Manag.* 34: 867-874.
- Khan, B.H.,** 2009. Non-Conventional Energy Resources”. 2009 by McGraw Hill Education.
- Li, Y., Park, S.Y., Zhu, J.,** 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew Sustain Energy Rev.* 15: 821-826.
- Li, Y., Zhang, R., He, Y., Zhang, C., Liu, X., Chen, C., Liu, G.,** 2014. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). *Bioresour Technol.* 156: 342-347.
- Li, Y.F., Nelson, M.C., Chen, P.H., Graf, J., Li, Y., Yu, Z.,** 2015. Comparison of the microbial communities in solid-state anaerobic digestion (SS-AÇ) reactors operated at mesophilic and thermophilic temperatures. *Appl Microbiol Biotechnol.* 99: 969-980.
- Liang, J., Lin, Y., Wu, S., Liu, C., Lei, M., Zeng, C.,** 2015. Enhancing the quality of bio-oil and selectivity of phenols compounds from pyrolysis of anaerobic digested rice straw. *Bioresour Technol.* 181: 220-223.

- Liew, L.N., Shi, J., Li, Y.,** 2011. Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. *Bioresour Technol.* 102: 8828-8834.
- Lin, L., Yang, L., Li, Y.,** 2015. Effect of feedstock components on thermophilic solid-state anaerobic digestion of yard trimmings. *Energy Fuels.* 29: 3699-3706.
- Lin, L., Yang, L., Xu, F., Michel, F.C., Li, Y.,** 2014. Comparison of solid-state anaerobic digestion and composting of yard trimmings with effluent from liquid anaerobic digestion. *Bioresour Technol.* 169: 439-446.
- Lin, L., Xu, F., Ge, X., Li, Y.,** 2018. Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water Nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 89:151-167.
- Lu, Q., He, Z.L., Stoffella, P.J.,** 2012. Land application of biosolids in the USA: a Review. *Appl Environ Soil Sci.* 2012: 1-11.
- Madigan, M.T., Martinko, J.M.,** 2006. Brock biology of microorganisms. 11th ed. Pearson: Prentice Hall.
- Maçsen, M., Holm-Nielsen, J.B., Esbensen, K.H.,** 2011. Monitoring of anaerobic digestion processes: a review perspective. *Renew Sustain Energy Rev.* 15: 3141-3155.
- Martin-Ryals, A., Schideman, L., Li, P., Wilkinson, H., Wagner, R.,** 2015. Improving anaerobic digestion of a cellulosic waste via routine bioaugmentation with cellulolytic microorganisms. *Bioresour Technol.* 189: 62-70.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S.,** 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renew Sustain Energy Rev.* 36: 412-427.
- Monlau, F., Sambusiti, C., Antoniou, N., Barakat, A., Zabaniotou, A.,** 2015b. A new concept for enhancing energy recovery from agricultural residues by coupling anaerobic digestion and pyrolysis process. *Appl Energy.* 148: 32-38.
- Monlau, F., Sambusiti, C., Ficara, E., Aboulkas, A., Barakat, A., Carrère, H.,** 2015a. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy Environ Sci.* 8: 2600-2621.
- Möller, K., Müller, T.,** 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Eng Life Sci.* 12: 242-257.
- Möller, K., Stinner, W.,** 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *Eur J Agron.* 30: 1-16.

- Nghiem, L.D., Manassa, P., Dawson, M., Fitzgerald, S.K., 2014.** Oxidation reduction potential as a parameter to regulate micro-oxygen injection into anaerobic digester for reducing hydrogen sulphide concentration in biogas. *Bioresour Technol.* 173: 443-447.
- Nkoa, R., 2014.** Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agron Sustain Dev.* 34: 473-492.
- Partanen, P., Hultman, J., Paulin, L., Auvinen, P., Romantschuk, M., 2010.** Bacterial diversity at different stages of the composting process. *BMC Microbiol.* 10: 1-11.
- Ponsá, S., Gea, T., Sánchez, A., 2010.** The effect of storage and mechanical pretreatment on the biological stability of municipal solid wastes. *Waste Manag.* 30: 441-445.
- Prakash, O., Kumar, A., Pandey, A., Kumar, A., Laguri, V., 2015.** A review on biogas plant. *International Journal of New Technologies in Science and Engineering.* 2: 84-93.
- Raposo, F., De La Rubia, M.A., Fernández-Cegri, V., Borja, R., 2012.** Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: an overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renew Sustain Energy Rev.* 16: 861-877.
- Ros, M., de Souza Oliveira Filho, J., Perez Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Moral, R., Coll, M.D., Pascual, J. A., 2017.** Mesophilic anaerobic digestion of pig slurry and fruit and vegetable waste: dissection of the microbial community structure. *J Clean Prod.* 156: 757-765.
- Sasaki, D., Hori, T., Haruta, S., Ueno, Y., Ishii, M., Igarashi, Y., 2011.** Methanogenic pathway and community structure in a thermophilic anaerobic digestion process of organic solid waste. *J Biosci Bioeng.* 111: 41-46.
- Sheets, J.P., Yang, L., Ge, X., Wang, Z., Li, Y., 2015a.** Beyond land application: emerging technologies for the treatment and reuse of anaerobically digested agricultural and food waste. *Waste Management.* 44:94-115.
- Sheets, J.P., Ge, X., Li, Y., 2015b.** Effect of limited air exposure and comparative performance between thermophilic and mesophilic solid-state anaerobic digestion of switchgrass. *Bioresour Technol.* 180: 296-303.
- Sheets, J.P., Ge, X., Li, Y.F., Yu, Z., Li, Y., 2016.** Biological conversion of biogas to methanol using methanotrophs isolated from solid-state anaerobic digestate. *Bioresour Technol.* 201: 50-57.
- Shi, J., Wang, Z., Stiverson, J.A., Yu, Z., Li, Y., 2013.** Reactor performance and microbial community dynamics during solid-state anaerobic digestion of corn stover at mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresour Technol.* 136: 574-581.

- Tiwary, A., Williams, I.D., Pant, D.C., Kishore, V.V.N., 2015.** Assessment and mitigation of the environmental burdens to air from land applied food-based digestate. *Environ Pollut.* 203: 262-270.
- Wang, K., Yin, J., Shen, D., Li, N., 2014.** Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: effect of pH. *Bioresour Technol.* 161: 395-401.
- Wang, X., Pan, S., Zhang, Z., Lin, X., Zhang, Y., Chen, S., 2017.** Effects of the feeding ratio of food waste on fed-batch aerobic composting and its microbial community. *Bioresour Technol.* 224: 397-404.
- Wei, L., Shutao, W., Jin, Z., Tong, X., 2014.** Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure. *Bioresour Technol.* 154: 148-154.
- Wolfe, M.L., Ting, K.C., Scott, N., Sharpley, A., Jones, J.W., Verma, L., 2016.** Engineering solutions for food-energy-water systems: it is more than engineering. *J Environ Stud Sci.* 6, 172-182.
- Wu, Y.R., He, J., 2013.** Characterization of anaerobic consortia coupled lignin depolymerization with biomethane generation. *Bioresour Technol.* 139: 5-12.
- Xu, F., Li, Y., Ge, X., Yang, L., Li, Y., 2017.** Anaerobic digestion of food waste – challenges and opportunities. *Bioresour Technol.* 247: 1047-1058.
- Xu, F., Shi, J., Lv, W., Yu, Z., Li, Y., 2013.** Comparison of different liquid anaerobic digestion effluents as inocula and nitrogen sources for solid-state batch anaerobic digestion of corn stover. *Waste Manag.* 33: 26-32.
- Xu, F., Wang, Z.W., Tang, L., Li, Y., 2014a.** A mass diffusion-based interpretation of the effect of total solids content on solid-state anaerobic digestion of cellulosic biomass. *Bioresour Technol.* 167: 178-185.
- Xu, S., Selvam, A., Wong, J.W.C., 2014b.** Optimization of micro-aeration intensity in acidogenic reactor of a two-phase anaerobic digester treating food waste. *Waste Manag.* 34: 363-369.
- Yang, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., Li, Y., 2014.** Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renew Sustain Energy Rev.* 40: 1133-1152.
- Yang, L., Li, Y., 2014.** Anaerobic digestion of giant reed for methane production. *Bioresour Technol.* 171: 233-239.
- Yang, L., Xu, F., Ge, X., Li, Y., 2015a.** Challenges and strategies for solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renew Sustain Energy Rev.* 44: 824-834.

- Yang, F., Li, G., Shi, H., Wang, Y.,** 2015b. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Waste Manag.* 36: 70-76.
- Yao, Y., Gao, B., Inyang, M., Zimmerman, A.R., Cao, X., Pullammanappallil, P., Yang, L.,** 2011. Removal of phosphate from aqueous solution by biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings. *J Hazard Mater.* 190: 501-507.
- Youngquist, C.P., Mitchell, S.M., Cogger, C.G.,** 2016. Fate of antibiotics and antibiotic resistance during digestion and composting: a review. *J Environ Qual.* 45: 537-545.
- Zhang, H., Schroder, J.,** 2014. Animal Manure Production and Utilization in the US. In: He Z, Zhang H, editors. *Appl. Manure Nutr. Chem. Sustain. Agric. Environ.* Dordrecht, the Netherlands: Springer; 1–21.
- Zhang, X., Zhong, Y., Yang, S., Zhang, W., Xu, M., Ma, A., Liu, W.,** 2014a. Diversity and dynamics of the microbial community on decomposing wheat straw during mushroom compost production. *Bioresour Technol.* 170: 183-195.
- Zhang, J., Lü, F., Shao, L., He, P.,** 2014b. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. *Bioresour Technol.* 168: 252-258.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y.,** 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog Energy Combust Sci.* 42: 35-53.
- Zhu, M., Lü, F., Hao, L.P., He, P.J., Shao, L.M.,** 2009. Regulating the hydrolysis of organic wastes by micro-aeration and effluent recirculation. *Waste Manag.* 29: 2042-2050.