KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BİYOBOZUNUR ATIKLARIN KURU FERMANTASYON YÖNTEMİ İLE BERTARAFININ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZGÜR KAPLAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BİYOBOZUNUR ATIKLARIN KURU FERMANTASYON YÖNTEMİ İLE BERTARAFININ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZGÜR KAPLAN

Prof Dr. Kadri Süleyman YİĞİT **Danışman, Kocaeli Üniv.**	.....
Prof Dr. Murat HOŞÖZ **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	.....
Prof. Dr. Cenk ÇELİK **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	.....
Doç. Dr. İsmail ÖZBAY **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Ünal UYSAL **Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Yaşar ŞEN **Jüri Üyesi, Düzce Üniv.**	.....
Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÜNVER **Jüri Üyesi, Yalova Üniv.**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kentlerde üretilen atıkların yönetimi ve toplanan atıkların bertarafı, doğa ve içinde yaşadığımız dünya için önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada kentlerde üretilen atıkların organik kısımlarının değerlendirilebilmesi için garaj tipi kuru fermantasyon yöntemi ile ilgili deneysel biyometan üretimi çalışmaları yapılmıştır.

Tez çalışmamın hayata geçirilmesinde katkıları olan öncelikle danışmanım Prof. Dr. Kadri Süleyman YİĞİT, Prof. Dr. Murat HOŞÖZ, Prof. Dr. Cenk ÇELİK, Dr. Öğr. Üye. Yaşar ŞEN, Doç. Dr. İsmail ÖZBAY, Doç. Dr. Başar UYAR, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği araştırma görevlisi arkadaşlarıma, Kocaeli Sharks Korumalı Futbol Takımı oyuncularına, İZAYDAŞ Genel Müdürü Muhammet SARAÇ, Genel Müdür Yardımcısı İsmail ULUDAĞ, Yakma Müdürü Şahan DEDE, Geri Dönüşüm Sorumlusu Arzu ULUTAŞ ve diğer İZAYDAŞ personeline katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her evresinde bana destek olmuş babam Mak. Müh. Mehmet KAPLAN'a, gerek tez çalışmamda gerekse hayatımın her anında desteklerini esirgemeyen kıymetli annem Güler KAPLAN'a ve kardeşim Barış KAPLAN'a şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK BİDEB 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı, Kocaeli Üniversitesi (KOÜ) Bilimsel Araştırmalar Birimi No:2014-027 ve No:2018-50 projeleri, KOÜ Alternatif Yakıtlar Araştırma-Geliştirme ve Uygulama Merkezi (AYARGEM) ve İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş. (İZAYDAŞ) ile gerçekleştirilmiş olup emeği geçen tüm personele ayrıca teşekkür ederim.

Haziran - 2019 Özgür KAPLAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. LİTERATÜR ÖZETİ 3
1.1. Dünyada ve Türkiye'de Kentsel Katı Atık Üretimi ve Yönetimi 3
1.2. Sıfır Atık ve Kentsel Katı Atıkların Kaynağında Ayrıştırılması 6
1.3. Kaynağında Ayrıştırılmış Organik Atıkların Bertarafı ve Değerlendirilmesi 10
1.4. Oksijensiz Fermantasyon 12
1.4.1. Oksijensiz fermantasyonun temelleri 13
1.4.2. Proses parametreleri 16
1.4.2.1. Sıcaklık 16
1.4.2.2. Karbon/Azot oranı (C/N) 17
1.4.2.3. pH 17
1.4.2.4. Toplam katı miktarı 18
1.5. Endüstriyel Kuru Fermantasyon Tesisleri 18
1.6. Kuru Fermantasyon ile Biyogaz Üretim Çalışmaları 21
2. MALZEME VE YÖNTEM 27
2.1. Deney Planı 27
2.2. Organik Atıklar ve Hayvansal Gübrelerin Karakteristikleri 30
2.3. Analitik Metotlar 31
2.3.1. Uçucu yağ asitleri 31
2.3.2. Alkalinite ve pH 32
2.3.3. Biyogaz metan içeriği 34
2.3.4. Kuru madde miktarı ve uçucu organik madde 34
2.3.5. Toplam organik karbon ve toplam Kjeldhal azotu 34
2.3.6. Toplam Amonyak Azotu 34
2.4. Kuru Fermantasyon Sistemi 35
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 38
3.1. Bulgular 38
3.1.1. Birinci deney 38
3.1.2. İkinci deney 41
3.1.3. Üçüncü deney 44
3.1.4. Dördüncü deney 47
3.1.5. Beşinci deney 50
3.1.6. Altıncı deney 53
3.1.7. Yedinci deney 56
3.1.8. Sekizinci deney 59
3.1.9. Dokuzuncu deney 64
3.1.10. Onuncu deney 68

3.2. Tartışma 71
3.2.1. Organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon sürecine etkisi 71
3.2.2. Hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisi 72
3.2.3. Perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisi 77
3.2.4. Hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisi 83
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
KAYNAKÇA 88
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 96
ÖZGEÇMİŞ 97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ülkelerde kişi başı atık üretimi (kg/kişi.gün) 3
Şekil 1.2. Gelir guruplarına göre ülkeler..... 4
Şekil 1.3. Ülkelerin gelir guruplarına göre atık kompozisyonları..... 5
Şekil 1.4. Örnek bir kaynağında ayrı toplama konteynırı 8
Şekil 1.5. Atık otomatı 9
Şekil 1.6. Oksijensiz fermantasyon süreci 13
Şekil 1.7. Valorga yöntemi..... 19
Şekil 1.8 Dranco yöntemi..... 19
Şekil 1.9. Kompogas yöntemi 20
Şekil 1.10. Gicon yöntemi..... 20
Şekil 1.11. Bekon yöntemi 21
Şekil 2.1. Kuru fermanter sistemi diyagramı 35
Şekil 2.2. Kuru fermanter sistemi 36
Şekil 3.1. Birinci deney UYA, alkalinite, pH grafiği..... 38
Şekil 3.2. Birinci deney UYA, kümülatif biyogaz ve metan üretimi, metan yüzdesi grafiği 39
Şekil 3.3. Birinci deney pH, UYA/TA ve metan yüzdesi grafiği 40
Şekil 3.4. İkinci deney UYA, alkalinite, pH grafiği 41
Şekil 3.5. İkinci deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği..... 42
Şekil 3.6. İkinci deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 43
Şekil 3.7. Üçüncü deney UYA, alkalinite, pH grafiği 44
Şekil 3.8. Üçüncü deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği..... 45
Şekil 3.9. Üçüncü deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 46
Şekil 3.10. Dördüncü deney UYA, alkalinite, pH grafiği..... 47
Şekil 3.11. Dördüncü deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği..... 48
Şekil 3.12. Dördüncü deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği..... 49
Şekil 3.13. Beşinci deney UYA-Alkalinite-pH grafiği 50
Şekil 3.14. Beşinci deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği..... 51
Şekil 3.15. Beşinci deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği..... 52
Şekil 3.16. Altıncı deney UYA, alkalinite, pH grafiği..... 53
Şekil 3.17. Altıncı deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği..... 54
Şekil 3.18. Altıncı deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 56
Şekil 3.19. Yedinci deneyde fermantere yüklenen tavuk gübresi..... 57
Şekil 3.20. Yedinci deney sırasında arızalanan emniyet valfi 58
Şekil 3.21. Yedinci deney sırasında tıkanan fermanter içi sprinkleri 58
Şekil 3.22. Sekizinci deneyde fermentlere yüklenen tavuk gübresi..... 60
Şekil 3.23. Sekizinci deney UYA, Alkalinite, pH grafiği..... 60

Şekil 3.24. Sekizinci deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği 61
Şekil 3.25. Sekizinci deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 62
Şekil 3.26. Sekizinci deney TAA ve pH grafiği 63
Şekil 3.27. Dokuzuncu deney UYA, alkalinite, pH grafiği 65
Şekil 3.28. Dokuzuncu deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği 66
Şekil 3.29. Dokuzuncu deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 67
Şekil 3.30. Onuncu deney UYA, alkalinite, pH grafiği 69
Şekil 3.31. Onuncu deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği 70
Şekil 3.32. Onuncu deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği 71
Şekil 3.33. Hayvansal gübre/organik atık oranı uçucu yağ asitleri grafiği 73
Şekil 3.34. Hayvansal gübre/organik atık oranı alkalinite grafiği 74
Şekil 3.35. Hayvansal gübre/organik atık oranı pH ve UYA/TA grafiği 75
Şekil 3.36. Hayvansal gübre/organik atık oranı kümülatif metan üretimi grafiği 76
Şekil 3.37. Resirkülasyon miktarı uçucu yağ asitleri grafiği 78
Şekil 3.38. Resirkülasyon miktarı alkalinite grafiği 79
Şekil 3.39. Resirkülasyon miktarı pH ve UYA/TA grafiği 80
Şekil 3.40. Resirkülasyon miktarı kümülatif metan üretimi grafiği 82

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Deney planı 27
Tablo 2.2. Organik atıkların karakterizasyonları 31
Tablo 3.2. NaOH ekleme miktarları..... 64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CH_4	:Metan
CH_3CH_2OH	:Etanol
CH_3CH_2COOH	:Propiyonik Asit
CH_3COOH	:Asetik Asit
CH_3OH	:Metanol
$C_6H_{10}O_4$	:Organik Atığın Tipik Kimyasal Formülü
$C_6H_{12}O_6$	:Şeker
°C	:Derece Celcius
C/N	:Karbon/Azot Oranı
CO	:Karbon Monoksit
CO_2	:Karbon Dioksit
HCl	:Hidrojen Klorür
H_2	:Hidrojen
H_2O	:Su
N_2O	:Nitröz Oksit
NO_x	:Nitrojen Oksit
NaOH	:Sodyum Hidroksit
pH	:Hidrojen Potansiyeli
SO_2	:Sülfür Dioksit

Kısaltmalar

FA	:Fenolftaleyn Alkalinitesi
HMM	:Gizli Markov Model
İZAYDAŞ	:İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.
KMM	:Kuru Madde Miktarı
KOM	:Kuru Organik Madde
MBİ	:Mekanik Biyolojik İşlem
RFDI	:Radyo Frekansı Tanımlama
SVM	:Destek Vektör Makinesi
TA	:Toplam Alkalinite
TAA	:Toplam Amonyak Azotu
TK	:Toplam Katı
TKN	:Toplam Kjeldal Azotu
TOK	:Toplam Organik Karbon
UK	:Uçucu Katı
UOM	:Uçucu Organik Madde
UYA	:Uçucu Yağ Asidi

BİYOBOZUNUR ATIKLARIN KURU FERMENTASYON YÖNTEMİ İLE BERTARAFININ VE BİYOMETAN ÜRETİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Kentsel katı atıkların yönetilmesi tüm dünyada küresel bir sorun haline gelmiştir. Düzgün yönetilemeyen kentsel katı atıkların hava, su ve toprak kirliliklerine yol açabildiği ve küresel ısınmaya katkıda bulunduğu bilinmektedir.

Bu tez çalışmasında, T.C. Cumhurbaşkanlığı'nca gerçekleştirilen "Sıfır Atık" projesinde belirtildiği gibi, kaynakların daha verimli kullanılması ve israfın önlenmesi amacıyla, öncelikli olarak kentsel katı atıkların kaynağında ayrıştırılması gerektiği saptanmış ve ambalaj atıklarının ayrıştırılması için bir metot önerilmiştir.

Kentsel katı atıkların kaynağında ayrıştırılması ile elde edilecek organik atıklar ve pazar, süpermarket ve hal gibi organik atıkların toplu olarak üretildiği yerlerden toplanabilecek organik atıkların geri kazanım sürecine dâhil edilme çabası, tez çalışmasının odak noktasıdır.

Bu tez çalışması kapsamında, organik kentsel katı atıkların geri kazanım sürecine katılabilmesi için, bir garaj tipi kuru fermantasyon tesisi tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Kuru fermantasyon tesisinde; organik atık kompozisyonunun, hayvansal gübre/organik atık oranının, perkolat suyu resirkülasyon miktarının ve hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon yöntemi ile biyometan üretimi sürecine etkileri incelenmiştir.

Yapılan deneyler ve araştırmalar sonucunda, pişmiş yemek atıklarının kuru fermantasyon süreçlerine dahil edilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerektiği, hayvansal gübre/organik atık oranında hayvansal gübre yüzdesi arttıkça biyometan üretiminin arttığı, perkolat suyu resirkülasyon miktarının arttırılmasının biyometan üretimini arttırdığı ve topraksı yapıya sahip endüstriyel tavuk gübresinin resirkülasyon sıklığının yüksek olduğu bu sistemlerde, ek ekipmanlar kullanılmadan biyometan üretimi için uygun bir gübre türü olmadığı belirlenmiştir.

Elde edilen en iyi biyometan üretim sonucu olan 430 NL CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ değeri, organik atık olarak sebze atığı ve hayvansal gübre olarak inek gübresi kullanıldığı, 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranında ve günde 12 resirkülasyon yapılan deneyde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyometan Üretimi, Kentsel Katı Atık, Kuru Fermantasyon, Sıfır Atık.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BIOMETHANE PRODUCTION AND DISPOSAL OF BIODEGRADABLE WASTE THROUGH DRY FERMENTATION METHOD

ABSTRACT

Management of municipal solid wastes has become a global problem in all over the World. It is known that inadequately managed municipal solid wastes can cause air, water and soil pollution and contribute to global warming.

In this thesis, as it was stated in the Zero Waste Project carried out by T.R Presidency, in order to use the resources more efficiently and prevent wastage, it was determined that municipal solid wastes should be separated at the source and a method was proposed for separate collection of packaging wastes.

The focus of the study is to recycle the organic wastes that can be collected either separately from the source or massively from the bazaars, markets or wholesale market halls.

Within the scope of this thesis, a garage type dry anaerobic digestion plant was designed and constructed in order to apply a recovery process to organic municipal solid wastes. In dry anaerobic digestion plant; the effects of organic waste composition, animal manure: organic waste ratio, percolate water recirculation rate and animal manure type on the dry anaerobic digestion were investigated.

Results of the experiments and researches revealed that; in order to use cooked food wastes in the dry anaerobic digestion processes more research is needed, the increase of animal manure percentage in the animal manure/organic waste ratio and increment of the percolate water recirculation increases the biomethane production. Also poultry manure with earthy structure is an inadequate manure type for the systems like this with high recirculation rate without auxiliary equipment.

The best biomethane production rate of 430 NL CH_4/kgVOM_{added} was obtained by using vegetable waste as organic waste and cow manure as animal manure, 35/65 animal manure: organic waste ratio and 12 recirculation per day.

Keywords: Biomethane Production, Municipal Solid Waste, Dry Anaerobic Digestion, Zero Waste.

GİRİŞ

Evsel organik atıkların bertarafı konusunda yapılan bu tez çalışmasının birinci bölümünde, kentsel katı atıkların dünyada ve Türkiye'deki üretim ve bertaraf durumları, atıkların kaynağında ayrı toplanması ve Sıfır Atık Projesi hakkında bilgiler verilerek teze giriş yapılmıştır. Kentlerde üretilen Geri dönüştürülebilirlerin ve tehlikeli atıkların ayrı toplanmasının ardından geriye kalan organik atıkların bertarafı ve geri kazanımı için kompostlama ve oksijensiz fermantasyon yöntemlerinden bahsedilmiş ve organik atıkların bertarafı için oksijensiz fermantasyon yönteminin kullanılabileceği yapılan literatür taramaları ile belirlenmiştir. Daha sonra oksijensiz fermantasyonun nasıl olduğu, fermantasyon sürecindeki işletme parametrelerinin biyogaz ve biyometan üretimine olan etkileri yapılan literatür taraması ile belirlenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, kentlerde üretilen organik atıklar (pazar atıkları ve pişmiş yemek atıkları) ve hayvan gübreleri (inek gübresi, endüstriyel tavuk gübresi ve evsel tavuk gübresi) ile farklı hayvansal gübre/organik atık oranlarında ve farklı perkolat suyu resirkülasyon miktarlarında kuru fermantasyon deneyleri yapılmış ve biyometan üretimi en fazla olan hayvan gübresi türü, hayvansal gübre/organik atık oranı ve resirkülasyon miktarı tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde dizayn edilen deney planı ile ilgili detaylı bilgi verilmiş, kuru fermantasyon sürecinde takip edilmesi gereken parametrelerin neler olduğu ve bunların nasıl ölçüldüğü anlatılmış, ayrıca tasarlanan ve imal edilen kuru fermantasyon deney setinin çalışma prensipleri açıklanmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünün bulgular kısmında, yapılan her deneyde elde edilen veriler bir araya getirilip literatür ile tartışılmıştır. Böylece yapılan deneylerin doğruluğu tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünün tartışma kısmında, birinci ve ikinci deneylerden elde edilen veriler ışığında, organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon

sürecine etkisi kısmında tez kapsamında toplanan organik atıkların (sebze ve pişmiş yemek atıkları) kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediği ve bu atıkların nasıl değerlendirilmesi gerektiği irdelenmiştir.

Ardından birinci, üçüncü ve dördüncü deneyler ile hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisi kısmında 15:35, 25/75 ve 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranlarında yapılan deneylerin parametreleri birbiriyle ve literatürle kıyaslanmış ve en uygun oran tespit edilmiştir.

Dördüncü, beşinci ve altıncı deneylerin verileri ile, perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisi kısmında günde 12, 6 ve 1 resirkülasyon koşullarında yapılan deneylerin parametreleri birbiriyle ve literatürle kıyaslanmış ve en uygun resirkülasyon miktarı tespit edilmiştir.

Dördüncü, yedinci ve sekizinci deney verileri doğrultusunda hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisinin belirlenmesi kısmında inek gübresi, endüstriyel yetiştirilen tavuk gübresi ve evsel yetiştirilen tavuk gübresi verileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır ve en uygun hayvan gübresi tespit edilmiştir.

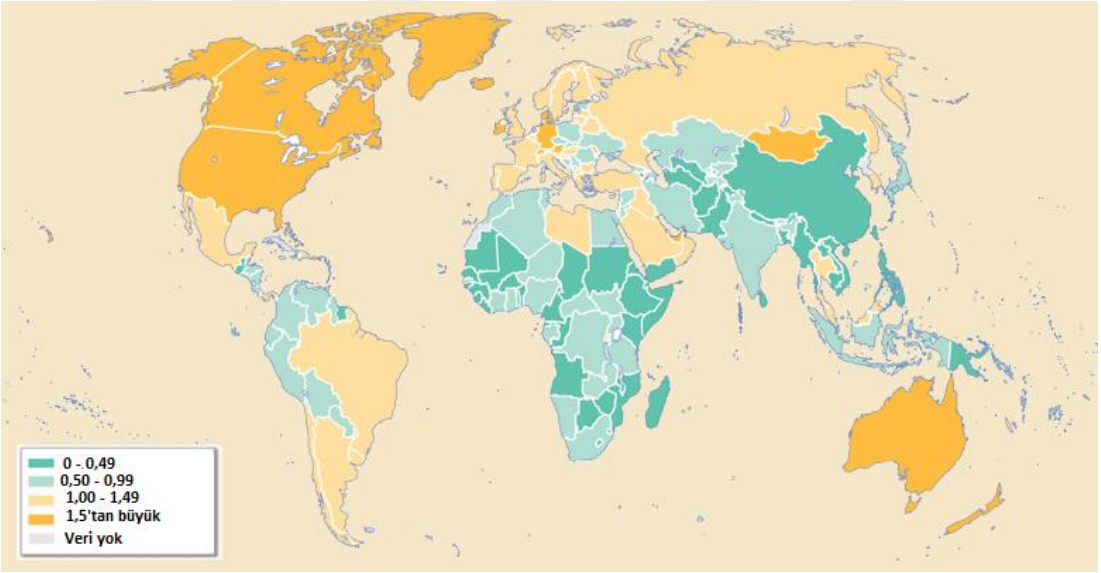
Tezin sonuç kısmında, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular özetlenmiş ve yapılabilecek potansiyel çalışmalarla ilgili yorumlar yapılmıştır.

1. LİTERATÜR ÖZETİ

1.1. Dünyada ve Türkiye'de Kentsel Katı Atık Üretimi ve Yönetimi

İnsan yaşadığı süreç içinde her zaman atık üretilmesine neden olmuştur. Atık üretilmesi, insan nüfusunun görece az ve göçebe yaşadığı zamanlarda çok önemli bir sorun değilken, artan kentleşme ve çarpık şehirleşme ile önemli bir sorun haline gelmiştir (Guisti, 2009).

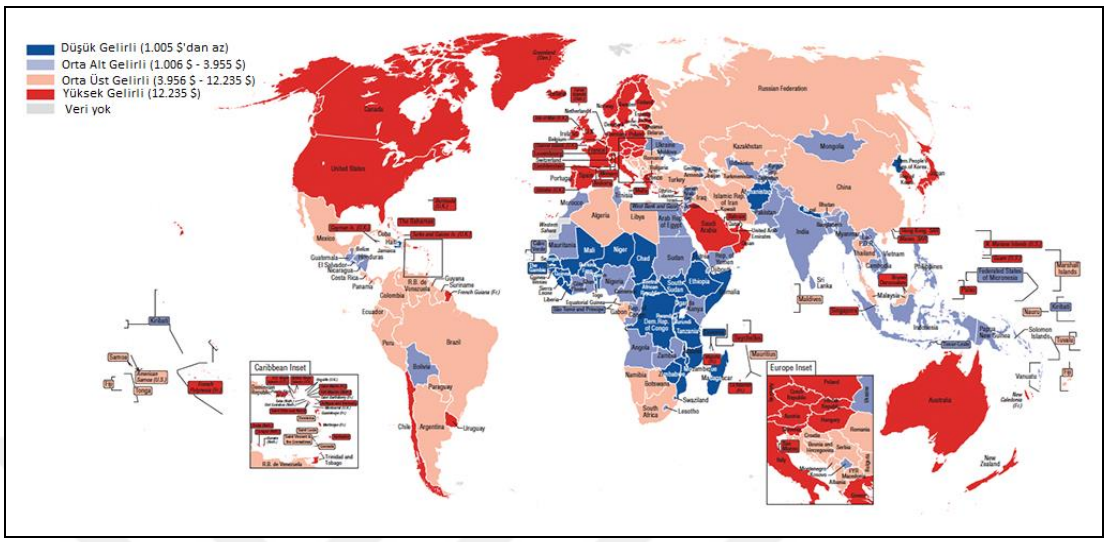
Uluslararası Katı Atık Birliği'nin hazırladığı bir rapora göre dünyadaki kentsel katı atık üretimi yaklaşık olarak yıllık 2 milyar tondur. Daha geniş bir yelpazede kentsel, ticari ve endüstriyel ile inşaat ve yıkım atıkları da hesaba katıldığında yıllık atık üretiminin dünya çapında 7 ila 10 milyar ton civarında olduğu bildirilmektedir (Wilson, 2015).



Şekil 1.1. Ülkelerde kişi başı atık üretimi (kg/kişi.gün), (Kaza ve diğ, 2018)

Atık üretim oranları gelir seviyesi, sosyo-kültürel yapılar ve iklim faktörleri ile ilişkilidir. Atık üretimi ülkeler arasında farklılıklar gösterse de, genel olarak kişi başı atık üretimi ulusal gelirle orantılıdır. Yüksek gelirli ülkelerde günümüzde atık üretim miktarları sabitlenmekte ve hatta çok az miktarda da olsa azalmakla birlikte, gelişmekte olan ülkelerde atık üretimi ekonomilerin de gelişmesi ile beraber

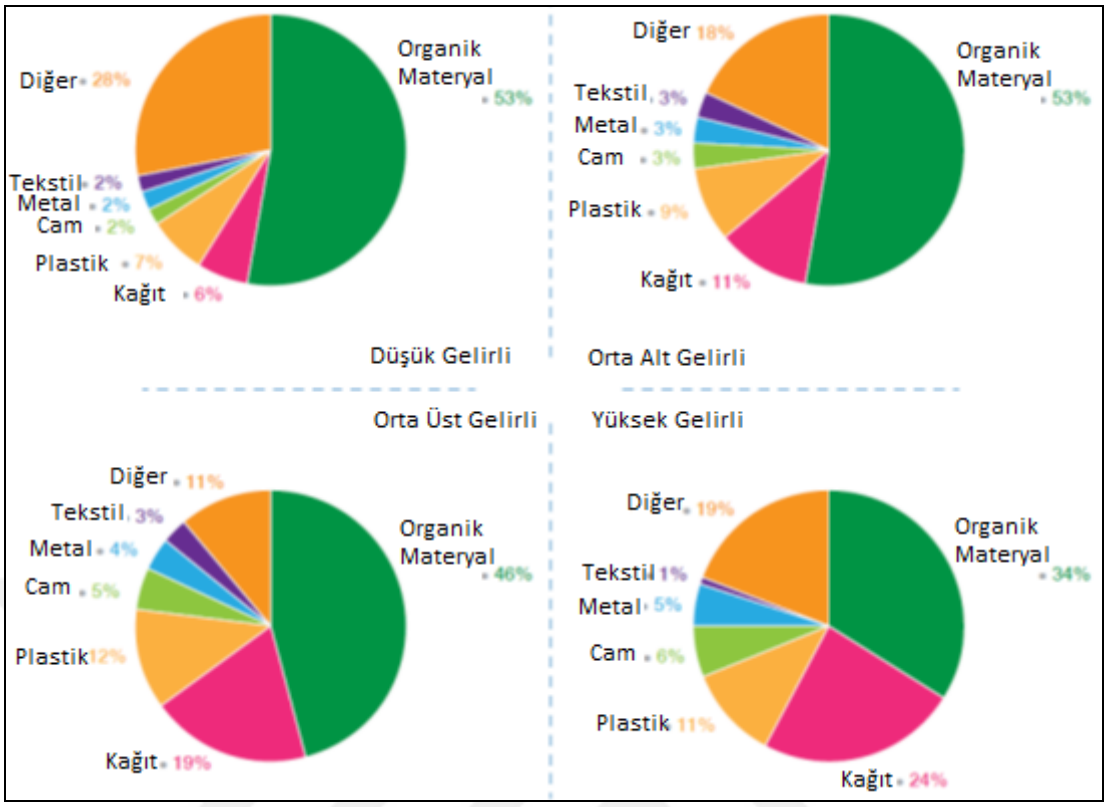
artmaktadır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de ülkelerin gelir gurupları ve kişi başına atık üretim miktarları görülmektedir.



Şekil 1.2. Gelir guruplarına göre ülkeler (The Atlas of Sustainable Development Goals 2018)

Türkiye için yıllık kişi başına atık üretimi yaklaşık 1 kg/kişi.gün olmakla beraber 1995 yılında kişi başına yıllık 441 kg atık üretilirken 2016 yılında 426 kg'a kadar düşerek 1995-2016 yılları arasında %3,4 azalma gerçekleşmiştir (Eurostat, 2018).

Düşük gelirli ülkelerde kentsel katı atıklar içindeki organik kısım % 50-70 oranlarında iken yüksek gelirli ülkelerde bu oran % 20-40 seviyelerindedir. Kâğıt atıkları oranlarının ülkelerin gelir düzeyleri ile orantılı olduğu dikkat çekmektedir. Kentsel katı atıklar içerisinde kâğıt atıklarının oranı yüksek gelirli ülkelerde % 24, ülkelerde % 11-19 ve düşük gelirli ülkelerde ise % 6 seviyelerinde olduğu Şekil 1.3'de görülmektedir. Plastik atıkları tüm gelir seviyelerinde % 7-12 arasında seyretmektedir ve gelir seviyesine bir bağlılık göstermemektedir. Metal, cam ve tekstil atıkları kuru geri dönüştürülebilir olarak nitelendirilebilmekle beraber bu atıkların oranları yüksek gelirli ülkelerde % 12, orta gelirli ülkelerde % 9 ve düşük gelirli ülkelerde de % 6 seviyelerinde bulunmaktadır (Wilson, 2015). Bu rakamlar göze alındığında kabaca gelir seviyesi yükseldikçe, kentsel katı atıklar içerisinde ambalaj atıklarının oranın arttığı gözlenebilmektedir.



Şekil 1.3. Ülkelerin gelir guruplarına göre atık kompozisyonları (Wilson, 2015)

Atık kompozisyonu atığın yoğunluk, nem oranı ve kalorifik değeri gibi fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Atığın fiziksel özellikleri, atık yönetimini ve kullanılacak atık toplama, işleme ve geri dönüştürme teknolojilerinin seçilmesinde etkilidir. Örneğin yüksek gelirli ülkelerde geçtiğimiz 50 yılda kentsel katı atığın kül miktarı azalmakla beraber kâğıt, plastik ve diğer ambalaj malzemelerinin oranlarının artmasıyla atığın yığın yoğunluğu azalmış ancak kalorifik değeri artmıştır. Azalan yoğunluk nedeniyle atık toplanmasında sıkıştırma ihtiyacı doğmuştur. Ayrıca ambalaj atığının artması ve artan kalorifik değer geri dönüşüm ve atıktan enerji süreçlerini daha çekici hale getirmiştir. Bununla beraber düşük gelirli ülkelerde organik atık oranını yüksek olması, atığın daha ıslak, yoğun ve düşük kalorifik değer sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle atık toplanması sırasında sıkıştırma ihtiyacı bulunmamakla beraber ek yakıt olmadan yakılamama ihtimali de bulunmaktadır (Wilson, 2015).

Şehirlerde kentsel katı atıkların toplanması ve tüm şehir nüfusunun bu hizmetten yararlanması bir genel halk sağlığı önceliğidir. Ortalama atık toplama oranı düşük gelirli ülkelerde %36, alt- orta gelirli ülkelerde %64, üst-orta gelirli ülkelerde %82 ve

yüksek gelirli ülkelerde %100 seviyelerindedir. Bazı ülkelerde atık toplama verileri çeşitlilik göstermektedir. Kırsal alanlardaki toplama oranları şehirlerdeki toplama oranlarına göre daha düşük olduğundan, ulusal toplama oranları şehirlerdeki toplama oranlarına göre daha düşük çıkabilmektedir. Dünyada 2 milyar insanın kentsel katı atık toplama hizmetinden faydalanamadığı tahmin edilmektedir (Wilson, 2015). 2016 yılında Türkiye'de 1390 belediyenin atık toplama hizmeti verip sadece 7 belediyenin atık toplama hizmeti veremediği ve ulusal çapta belediyelerin %99'unun atık toplama hizmeti verdiği belirtilmiştir (TUİK, 2018).

Kentsel katı atıkların kontrollü bertaraf edilmesi çevre korunması açısından çok önemlidir. Yüksek gelirli ülkelerde kentsel katı atıkların %100'ü, üst-orta gelirli ülkelerde %95'i, düşük gelirli ülkelerde %50'si kontrollü olarak bertaraf edilmektedir. Daha düşük gelirli ülkelerde atık bertarafı kontrolsüz döküm sahalarından ibaret olup bu alanlarda açıkta yakma yapılmaktadır. Dünya çapında 3 milyar insanın kontrollü atık bertaraf tesislerine erişiminin olmadığı tahmin edilmektedir (Wilson, 2015). 2016 yılında Türkiye'de belediyelerde toplanan 31,6 milyon ton atığın, % 61,2'si düzenli depolama tesislerine, % 28,8'i belediye çöplüklerine ve % 9,8'i geri kazanım tesislerine gönderilirken, % 0,2'si açıkta yakılarak, gömülerek ve/veya dereye/araziye dökülerek bertaraf edilmiştir (TUİK, 2018).

Geri dönüşüm; kısıtlı kaynakları korumak, bertaraf gerektiren atık miktarını azaltmak ve gelir elde etmek için güzel bir yöntemdir. Bununla birlikte geri dönüşüm materyallerin yeterli yüksek konsantrasyonda olmasına, ayrı ve temiz tutulmasıyla başarı sağlayabilir. Yüksek gelirli ülkelerde geri dönüşüm oranları son 30 yılda ilgili yasal ve ekonomik araçlar ile sürekli olarak artmıştır. Düşük gelirli ülkelerde yasal olmayan sektör %20-30 seviyelerinde kentsel katı atık geri dönüşümü sağlayabilmiştir (Wilson, 2015).

1.2. Sıfır Atık ve Kentsel Katı Atıkların Kaynağında Ayrıştırılması

T.C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde gerçekleştirilen sıfır atık projesi; israfın önlenmesini, mevcut kaynakların daha verimli kullanılmasını, atık oluşum nedenlerinin gözden geçirilerek atık oluşumunun engellenmesi veya minimuma indirilmesi, atığın üretilmesi durumunda ise kaynağında ayrıştırılması ve geri kazanımının sağlanmasını kapsayan bir atık yönetim felsefesidir.

Atıkların geri dönüşüm ve geri kazanım süreci içinde değerlendirilmeden bertarafı, hem maddesel hem de enerji olarak ciddi kaynak kayıpları yaşanmasına neden olmaktadır.

Dünya üzerindeki nüfus ve yaşam standartları artarken tüketimde de kaçınılmaz şekilde bir artış yaşanmakta ve bu durum doğal kaynaklarımız üzerindeki baskıyı artırarak dünyanın dengesini bozmakta, sınırlı kaynaklarımız artan ihtiyaçlara yetişememektedir.

Bu durum göz önüne alındığında, doğal kaynakların verimli kullanılmasının önemi daha da ortaya çıkmaktadır. Bu nedenledir ki son yıllarda tüm dünyada sıfır atık uygulama çalışmaları hem bireysel hem kurumsal hem de belediye genelinde yaygınlaşmaktadır.

Sıfır atık yaklaşımının esas alınması ile sağlanacak avantajlar;

- ❖ Verimliliğin artması,
- ❖ Temiz ortam kaynaklı olarak performansın artması,
- ❖ İsrafın önüne geçildiğinden maliyetlerin azaltılması,
- ❖ Çevresel risklerin azalmasının sağlanması,
- ❖ Çevre koruma bilincinin kurum bünyesinde gelişmesine katkı sağlandığından çalışanların "duyarlı tüketici" duygusuna sahip olmasının sağlanması,
- ❖ Ulusal ve uluslararası pazarlarda kurumun "Çevreci" sıfatına sahip olmasının sağlanması olup bu sayede saygınlığının arttırılmasıdır (URL-1).

Kentsel katı atıkların kaynağında ayrıştırılması çapraz kontaminasyonu engellemekte ve materyallerin kalitesini koruyarak daha etkili bir geri dönüşüm sağlamaktadır. Ayrıca ayrıştırılmış atık, atık bertaraf ve döküm sahaları etrafındaki ekosistem ile atık toplayıcıların sağlık ve güvenlik risklerini azaltmaktadır. Ayrıştırmanın avantajlarına rağmen geri dönüşümden önce kaynağında ayırma resmi kentsel katı atık yönetim sistemlerinde yenidir. Yüksek gelirli ülkelerdeki yüksek geri dönüşüm oranları neredeyse tamamen kaynağında ayırmaya bağlıdır. Bunun sonucunda geri dönüşüm için temiz geri dönüştürülebilir malzemeler toplanabilmektedir (Wilson, 2015). Organik atıklar ve ambalaj atıklarının ayrı toplanması için farklı teknolojiler bulunmaktadır.

Türkiye Cumhuriyeti hükümeti 2017 yılı için ambalaj atıklarında geri kazanım/geri dönüşüm hedefi olan %54 değerine (cam, plastik, metal, kağıt/karton) ulaşmıştır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2017, Pagçev 2019). Bunun yanında bazı Avrupa Birliği ülkeleri tüm atık fraksiyonlarında %80 ayrı toplama verimi elde etmiştir. Kentsel katı atıkların kaynağında ayrıştırılması, metal, cam ve plastik gibi farklı atık fraksiyonlarının, atıkların üretildikleri yerde ayrı toplanması demektir. Kaynağında ayrıştırma, depozito uygulamaları, renkli poşetler ve ayrı toplama konteynırları gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Şekil 1.4'de örnek bir ayrı toplama konteynırı görülebilir. Ancak, bu uygulamalarda her zaman tüketici hatası bulunabilmektedir. Yani tüketici atığını yanlış bir poşete veya konteynır bölmesine atabilmektedir (Korucu ve diğ., 2016).



Şekil 1.4. Örnek bir kaynağında ayrı toplama konteynırı

Şekil 1.5'te görülebilen atık otomatları, ambalaj atıklarının otomatik olarak ayrı toplanması için kullanılan bir makinedir. Bu makineler kaynağında ayrıştırmada insan faktörünü ortadan kaldırmakta ve daha önce bahsi geçen insan hatalarının önüne geçmektedir. Ayrıca kullanıcıları direkt olarak ödüllendirebilmektedir. Atık otomatlarının çalışma prensipleri yaklaşım sensörleri, görüntü işleme, barkot okuma ve radyo frekansı tanımlama (RFID) olarak belirtilebilir. İlk üç yöntem, ambalaj atıklarının doluluk, deformasyon, şekil, yapı ve kütle olarak çeşitliliklerinden dolayı atık yönetimi uygulamalarında yetersizlik göstermektedir.



Şekil 1.5. Atık otomatı (URL-2)

Tüm paketleme atıklarını üretim aşamasında radyo frekansı tanımlama (RFID) etiketi ile etiketlemek etkili bir çözüm gibi gözükse de bu etiketleme işlemi maliyetleri arttırmakta (0,05-0,10 $/etiket) ve ayrıca bu etiketler doğaya zarar vermektedir. Sonuç olarak atık otomatları için ucuz ve etkili bir ayırma tekniği geliştirilmesi gereklidir (Korucu ve diğ., 2016).

Korucu ve diğ., (2016) tarafından, ses tanıma tekniğinin atık otomatlarında bir ayırma teknolojisi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, ambalaj atıklarının serbest düşme, pnomatik vurma ve hidrolik ezme süreçleri ile ürettikleri sesler dinamik ve kondenser mikrofonlarla kaydedilmiştir. Kaydedilen sesler ile destek vektör makinesi (SVM) ve gizli Markov model (HMM) tabanlı sınıflandırma sistemi eğitilmiştir. Eğitilen sistemler farklı boyutlardaki metal, cam, plastik ve kâğıt atıkların ürettikleri sesler ile test edilmiştir. Hidrolik ezme deneylerinde gürültü çok fazla olduğundan sonuç alınamamıştır. Serbest düşme deneylerinde HMM ve SVM sınıflandırıcıları her iki mikrofon türü için %100 atık tipi ayırma başarısı göstermiştir (Korucu ve diğ., 2016).

1.3. Kaynağında Ayrıştırılmış Organik Atıkların Bertarafı ve Değerlendirilmesi

Kentsel katı atıkların ve organik atıkların değerlendirilmesi ve bertarafı için en sık kullanılan yöntemler oksijensiz fermantasyon, kompostlama, mekanik biyolojik işlem ve yakma olarak sıralanabilir. Bu teknolojiler için atık kaynağında ya da mekanik biyolojik işlemlerde ayrı mekanik ayırma tesislerinde ayrıştırılabilir. Avrupa Birliği'nde oksijensiz fermantasyon için en uygun metodun organik atıkların kaynağında ayrılması olduğu tespit edilmiştir (Al Seadi ve diğ., 2013, Guisti 2009).

Organik atıkların düzenli depolama sahalarında bertarafının kötü kokuların yayılmasına ve karbondioksit ve metan gibi sera gazı emisyonlarının üretilmesine neden olduğunu belirtmiştir. Ayrıca düzenli depolama sahalarının alan olarak büyük olması, çöp sızıntı suyu geçirimsizliğinin sağlanmasını zorlaştırmaktadır. Düzenli yönetilmeyen çöp sızıntı suyu su kaynaklarını ve toprağı kirletmektedir. Yakma tesislerinin havayı SO_2, NO_x, N_2O, HCl, HF, CO, CO_2, dioksin ve furan gibi emisyonlarla kirlettiği bilinmektedir (Guisti 2009). Straif ve diğ., (2013) yayınladıkları raporda dış hava kirliliğini grup 1, insanlara karşı kanserojen maddeler, sınıfına koymuştur. Bu grupta asbest, tütün dumanı ve dizel egzozu gibi ajanlar da bulunmaktadır. Bu bağlamda yakma teknolojileri, katı atık yönetim sistemleri arasında pek de tercih edilmesi gereken bir yönetim şekli olarak gözükmemektedir.

Mekanik biyolojik işlem (MBİ); kalıntı atıkların birçok çıktıya dönüştürüldüğü mekanik ve biyolojik süreçlerin bütününü kapsamaktadır. Mekanik süreçler cam ve metaller gibi kuru geri dönüştürülebilirlerin ayrılması, biyolojik süreçler de organik atıkların su miktarının azaltılması ve işlenmesini kapsar. MBİ tesisinde elde edilen organik atıklar oksijensiz fermantasyon ve kompostlama yöntemleri ile işlenebilir. Kompostlama ve oksijensiz fermanstasyon aynı tesiste bir arada bulunabilmektedir. MBİ tesislerinde üretilen kompostlama ve oksijensiz fermantasyon sonrası ürünlerin (digestate) toprakta değerlendirilmesi süreçleri, önceden belirlenmiş limit değerleri aşan kimyasal kirleticiler nedeni ile problemli olabilmektedir. Bu nedenle MBT tesislerinde elde edilen kompostlama ve fermantasyon sonu ürünlerin faydalı bir şekilde kullanımı çok zordur ve faydalanılamayan bu ürünler bertaraf bedeli yaratarak MBİ tesislerine uzun vadede negatif etki göstermektedir (Al Seadi ve diğ., 2013).

Kompostlama; atmosferik oksijen varlığında, ortamda doğal olarak oluşan çürüme işlemi için kullanılan terimdir. Örneğin, yığın halindeki yapraklar ağaçlardan orman tabanına düştüğünde, biyo-mikrobiyal aktivite onu ağaçların kök sistemi tarafından yukarı doğru alınan humus ve besinlere dönüştürür. Kompostlamanın teknik süreci esas olarak doğal sürecin kontrollü ve hızlandırılmış bir versiyonudur. Kompost toprak iyileştirici ve bitkiler için gübre olarak kullanılır. Toprağa uygulanması humus ve yavaş bırakan makro ve mikro besinleri toprağa getirir, nemin tutulmasına katkıda bulunur ve toprak yapısını iyileştirir. Organik atıklar gibi geri dönüşümden yapılan kompost kullanımı çevresel olarak sürdürülebilir kabul edilir.

Kompost küçük bir ölçekte, örneğin bireysel bir evde veya pazar amaçlı büyük bir endüstriyel ölçekte üretilebilir. Ev kompostu olarak da adlandırılan küçük ölçekli kompostlaştırma, özel konutların arka bahçesinde ya da evsel atıkların ayrıştırılmış organik kısmı, bahçe atıklarının yanı sıra çeşitli katı hayvan gübreleri, ev tuvaletleri kullanarak daha küçük tarım faaliyetlerinde yapılabilir. Ev kompostlama, kompost kutuları, solucan kutuları, kompostlama tuvaletler, sinek larvaları, bokashi kompostlama, özel mikroorganizmalar kullanarak vb. çeşitli yöntemler ve malzemeler kullanılarak da yapılabilir. Ayrıca, tünel kompostlama sistemleri, eğitim kurumlarında, hastanelerde, otellerde veya ticari mutfak operasyonları bulunan işletmelerde kullanılabilir.

Endüstriyel ölçekli kompostlama için, tünel kompostlaştırma, havalandırılmış statik kazık kompostlama, vermikültür, vb. bir dizi kompostlama metodu ve tekniği mevcuttur. Sonuç, çoğu zaman belirli kullanımlar için onaylanmış olan çeşitli kompost ürünleridir. Avrupa'daki kompostlaştırma hakkında daha fazla bilgi Avrupa Komisyonu yayınlarıdan temin edilebilir (Al Seadi ve diğ., 2013, URL-3).

Birleşik Krallık çevre, gıda ve kırsal ilişkiler bakanlığı (URL-4) yiyecek atıklarının kompostlama yerine oksijensiz fermantasyon yöntemi ile bertarafının çevre açısından daha faydalı olacağını belirtmektedir.

Khalid ve diğ., (2011) göre son yıllarda organik atıklar değerli ürünlere dönüştürülebilen yeni bir enerji kaynağı olarak görülmektedir ve anaerobik fermantasyon yöntemi ile biyogaz üretimi de bu işlem için elverişli, en umut vaat eden proses olarak değerlendirilmektedir.

1.4. Oksijensiz Fermantasyon

Oksijensiz fermantasyon, sindirilebilir maddelerin serbest oksijen yokluğunda çürüdüğü kontrollü bir mikrobiyolojik işlemdir. Anaerobik sindirim süreci birçok oksijensiz doğal ortamda gerçekleşir. Endüstriyel süreç, bir biyogaz tesisinin parçası olan özel olarak tasarlanmış bir fermantasyon tankında yer alır. Oksijensiz fermantasyon sürecinin çıktısı biyogaz ve fermantasyon sonu ürünlerdir. Biyogaz (% 45-80 Metan) yenilenebilir bir yakıt olarak, doğrudan yanma ve kojenerasyon (yenilenebilir elektrik ve / veya ısı üretimi) uygulamaları ile biyometana (> %94 Metan) dönüştürülerek doğalgaz hattına enjekte edilebilen veya taşıt yakıtı olarak kullanılabilen, metan bakımında zengin bir gazdır. Fermantasyon sonu ürün, organik atığın çürümesinden sonra kalan artıklar olup oksijensiz fermantasyon işleminin yan ürünüdür. Fermantasyon sonu ürün, fermanter tanktan, çamur benzeri veya sıvı bir ürün olarak çıkar. Bitki makro ve mikro besin maddeleri açısından zengindir. Gübre ya da toprak şartlandırıcı olarak ilgili kalite gerekliliklerini sağladıktan sonra tarımsal alanlara uygulanabilir (Al Seadi ve diğ., 2013, URL-4).

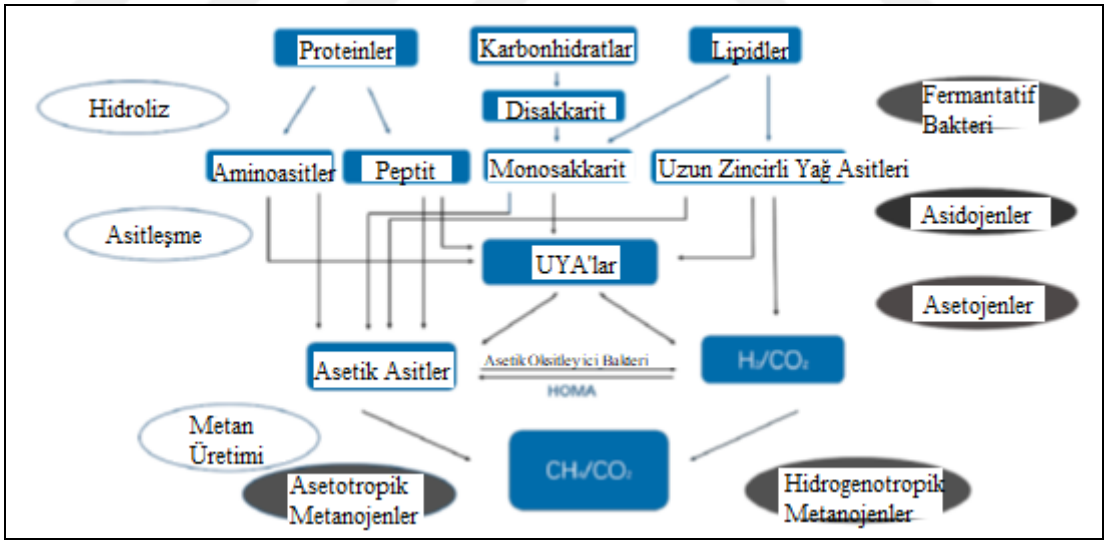
Kaynakta ayrıştırma, oksijensiz fermantasyonun kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak ve yüksek kalitede (fiziksel kirliliklerden arındırılmış) ikincil ürünler elde etmek açısından atık kompozisyonlarına uygulanacak en ideal ön işlemdir. Kimyasal ve biyolojik safsızlıklar da sıkı bir şekilde izlenmeli ve fermantasyon son ürünleri, bitki gübresi olarak güvenli ve faydalı kullanılabilecek şekilde sınıflandırılmalıdır. Oksijensiz fermantasyon süreciyle veya süreç öncesi ve sonrası uygulanan işlemlerle zararsız bileşiklere ayrıştırılamayan kimyasal kirleticiler, kirletici maddeler, toksinler, patojenler veya diğer fiziksel safsızlıklar oksijensiz fermantasyon besleme materyallerinde bulunmamalıdır. Bunların mevcudiyeti oksijensiz fermantasyon sürecini aksatmakla beraber, aynı zamanda fermantasyon sonu ürünün çiftlik arazisinde kullanılmasını da engellemektedir. Uygulamada, bu tür safsızlıklar ile kirlenmiş olan hammaddeler, fermantasyon sonu ürünün gübre olarak kullanılması düşünülen oksijensiz fermantasyon süreçlerinde kullanılmaz (Al Seadi ve diğ., 2013, URL-4).

Oksijensiz fermantasyon, bugün Avrupa'daki organik atıkların işlenmesi için standart bir teknolojidir. Kaynağında ayrıştırılmış evsel atıklar ve diğer benzer atıklar, başka

herhangi bir alt-substrat olmaksızın oksijensiz fermantasyon sistemlerinde fermante edilebilir ya da tarımsal biyokütle ve/veya çeşitli gıda, tarım ve endüstrilerden elde edilen diğer sindirilebilir atıklarla birlikte fermante edilebilir. Avrupa'da evsel atığın fermante edilebilir kısmını işleyen tesis sayısı 1990 yılında 5 iken, 2010'da 195'e yükselmiş ve toplam kapasiteleri 5,9 milyon ton/yıl olmuştur. Bu kapasitenin her 5 yılda bir ikiye katlanması beklenmektedir (Al Seadi ve diğ., 2013, URL-4). 2010 yılında Avrupa'da üretilen kentsel katı atıkların organik kısmının %3'ü oksijensiz fermantasyon sistemlerinde işlenmiştir (Burrows, 2013).

1.4.1. Oksijensiz fermantasyonun temelleri

Organik atıklar, karbonhidratlar (selüloz, hemiselilöz, nişasta vb.), yağlar ve proteinlerden oluşmaktadır. Genelde mikroorganizmalar bu polimerleri mikroorganizma hücre duvarından geçmemeleri nedeni ile işleyemezler. Bu nedenle asidojenik bakteriler xylanase, amylase, lipage, proteolytic enzimler gibi enzimler salgılayarak bu polimerleri monomerleri olan şekerler, aminoasitler ve yağ asitlerine hidroliz ederler. Oksijensiz sindirim süreci Şekil 1.6'te verilmiştir.



Şekil 1.6. Oksijensiz sindirim süreci (Li ve diğ., 2019)

Organik atığın tipik kimyasal formülü $C_6H_{10}O_4$ olarak verilebilir. Hidroliz reaksiyonu Denklem (1.1)'de verilmiştir (Kothari ve diğ., 2014).

$$C_6H_{10}O_4+2H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6+H_2 \qquad (1.1)$$

Hidrolize edilen bu monomerler (monomerik şekerler, amino asitler ve yağ asitleri) asidojen bakterler tarafından büyüme ve üremeleri için kullanılır. Bu sırada asetik asit, propiyonik asit, bütirik asit ve valerik asit gibi yağ asitlerinin yanında karbondioksit, su ve hidrojen üretirler. Bu bakteriler hızlı ürerler ve ikiye katlanma zamanı 30 dakikadır. Bu aşamaya asidogenez denir. Yağ asidi oluşumu Denklem (1.2) ve Denklem (1.3) ile gösterilebilir.

$$C_6H_{12}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH+2CO_2 \quad (1.2)$$

$$C_6H_{12}O_6+2H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH+2H_2O \quad (1.3)$$

Asetik asit harici propiyonik asit, bütürik asit ve valerik asit gibi yağ asitleri asetojenik bakteriler tarafından büyüme ve üreme için kullanılırlar ve asetik asit, karbondioksit ve hidrojen üretirler. Asetojenik bakteriler yavaş ürerler ve ikiye katlanma zamanı 1,5 ile 4 gün arasında değişir. Bu aşamaya asetojenez denir. Asetojenik reaksiyon Denklem (1.4)'deki gibidir.

$$CH_3CH_2COOH+2H_2O \leftrightarrow CH_3COOH+CO_2+3H_2 \quad (1.4)$$

Metanojen mikroorganizmalar asetik asit, hidrojen ve karbondioksiti işleyerek metan elde ederler. Bu aşamaya metanojenez denir. Metan asetik asit, etanol, metanol veya karbondioksit ve hidrojen gibi birçok basit maddeden üretilir. Asetik asidi işleyip metan üreten metanojenlere asetoklastik metanojenez, hidrojen ve karbondioksiti işleyen metanojenlere da hidrojenotropik metanojenez denir. Metanojenler yavaş ürerler ve ikiye katlanma zamanları 2 ile 4 gün arasında değişir. Sitokiyometrik olarak üretilen metanın %70'i asetat yoluyla üretilir. Metanojenez reaksiyonları aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

$$2CH_3CH_2OH+CO_2 \leftrightarrow 2CH_3COOH+CH_4 \quad (1.5)$$

$$CH_3COOH+CO_2 \leftrightarrow CH_4+2CO_2 \quad (1.6)$$

$$CH_3OH+H_2 \leftrightarrow CH_4+H_2O \quad (1.7)$$

$$CO_2+4H_2 \leftrightarrow CH_4+2H_2O \quad (1.8)$$

Oksijensiz fermentasyonda rol oynayan üç temel mikrobiyal topluluk vardır. Birinci gurup organizmalar organik polimerleri temel yapıtaşlarına (yağ asitleri, monosakkaritler, aminoasitler vb.) hidroliz eder. İkinci grup organizmalar birinci grup organizmaların indirgenmiş olduğu ürünleri asetik asit gibi basit organik asitlere fermente eder. İkinci grup organizmalar fakültatif ve zorunlu oksijensiz bakterilerden oluşurlar ve literatürde asidojenler diye adlandırılırlar. Üçüncü grup organizmalar hidrojen ve asetik asidi metan ve karbondioksite dönüştürürler. Metanojenik veya metanojen bakteriler olarak adlandırılırlar. Çöp depolama sahaları ve oksijensiz fermanterlerde gözlenen birçok bakteri geviş getiren hayvanların midelerindeki ve göl ile nehirlerin organik sedimentlerindekilere benzemektedir. En önemli metanojenik bakteriler hidrojen ve asetik asidi işleyenlerdir. Üreme hızları çok düşüktür. Bu nedenle organik atıkların oksijensiz işlenmesinde hız sınırlayıcı olarak kabul edilirler.

Standart redox potansiyeli koşullarında asetojenler ve metanojenler substratlar için mücadele etmektedir ve metanojenez, karbondioksitten asetat sentezine göre termodinamik olarak daha olabilir bir süreçtir. Bundan dolayı asetojenler hayatta kalmak için geniş bir metabolik transformasyona sahiptir.

Organik maddelerin oksijensiz fermantasyonu için optimum koşullar nötr-yakın pH, sabit sıcaklık (mezofilik (30-40°C) veya termofilik (50-60°C)) ve görece sabit besleme miktarıdır. Ancak mikroorganizmalar dar bir sıcaklık aralığında yaşamaya adapte olmuşlardır. Oksijensiz kuru sindirim ile atık substratları indirgemek için bakterilerin beslenme ihtiyaçlarına dikkat edilmelidir. Optimum olmayan koşullarda farklı mikroorganizma türleri arasında dengesizlikler oluşabilmektedir. Bakteriler için en önemli besin karbon ve azottur. Ancak bu iki element uygun bir oranda verilmelidir. Aksi takdirde amonyak oluşarak bakteri üremesini engelleyebilir. Uygun karbon/azot oranı (C/N) karbon ve azot kaynaklarının sindirilebilirlikleri ile ilgilidir. En çok karşılaşılan C/N oranı dengesizliği, organik asitlerin oluşmasıyla metanojen bakterilerinin baskılanarak üremelerinin engellenmesidir. Asit oluşumu genelde doğal kimyasal tamponlar ve metan üretmek için asitleri kullanan metanojenler tarafından kontrol edilir. Bu doğal kontrol mekanizması aşırı besleme yapılması, organik asitlerin tüketiminden fazla üretilmesi, engelleyici bileşenlerin birikmesi veya beslenen materyalde doğal pH tamponu olan karbonat veya amonyum yoksunluğu olduğunda bozulabilir. Bunların dışında toplam katı (TK) içeriğinin %40'ın üzerinde olması

mikroorganizmaların faaliyet göstereceği yüzey alanının azalması nedeniyle proses inhibisyonuna neden olabilir (Kothari ve diğ., 2014).

1.4.2. Proses parametreleri

1.4.2.1. Sıcaklık

Mikrobiyal aktivitelere göre metan oluşumu için; psikrofilik sıcaklık (10-20 °C arasında), mezofilik sıcaklık (20-45 °C arasında, genelde 35 °C) ve termofilik sıcaklık (50-65 °C arasında, genelde 55 °C) olmak üzere üç temel sıcaklık aralığı belirlenmiştir (Wellinger, 1999).

Psikrofilik fermanterler, 1980'lerin sonlarına doğru biyogazın sadece ısıtma amaçlı kullanıldığı zamanlarda popüler olmakla birlikte, günümüzde mezofilik fermanterler daha sık kullanılmaktadır. Ancak büyük ölçekli merkezi biyogaz santralleri termofilik şartlarda çalıştırılmaktadır. Fermanter tipine ve besi malzemesine göre sıcaklık koşulları değişmekle beraber maksimum biyogaz üretimi için sıcaklığın sabit bir seviyede tutulması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda termofilik fermanterlerin, mezofilik fermanterlere göre daha yüksek metan üretimine, daha düşük bekleme süresine ve daha iyi start-up sürecine sahip olduğu belirtilmektedir (Kothari ve diğ., 2014).

Termofilik koşullar altında oksijensiz fermantasyon sürecinin dezavantajı, yüksek enerji ihtiyacı ve tutarlı metan üretimi için ihtiyaç duyulan dirençli metanojen çeşitliliğinin düşük olmasıdır. İki aşamalı bir oksijensiz fermantasyon işleminde termofilik ve mezofilik sıcaklığın kombinasyonu, kuru fermantasyonu optimize etmek için daha iyi bir seçenek sunabilir, çünkü metanojenler mezofilik sıcaklıkta daha dirençlidir (Fagbohungbe ve diğ., 2015).

Termofilik süreçte metan verimindeki bir artışın, reaktörü yüksek sıcaklıkta tutmak için artan enerji ihtiyacına karşı dengelenmesi gerektiği belirtilmelidir. Belli bir aralıktaki yüksek sıcaklıklar hidrolizi artırabilir ve fermantasyon sürecini hızlandırabilir, ancak fermantasyon sistemi daha az stabil hale gelir ve ayrıca daha fazla ısı girişi gerekir. Bununla birlikte termofilik bakteriler küçük sıcaklık değişikliklerine karşı çok hassastır (Jha ve diğ., 2011).

1.4.2.2. Karbon/Azot oranı (C/N)

C/N oranı organik maddelerde karbon ile azot arasındaki ilişkiyi temsil eder. Stabil bir oksijensiz fermantasyon prosesi için C/N oranı ne çok ne de az olmalıdır. Yüksek C/N oranlarında metanojenlerin azotu hızlı bir şekilde tüketmesi gaz üretiminin düşmesi ile sonuçlanmaktadır. Düşük C/N oranlarında amonyak birikmesi nedeniyle pH 8,5 değerinin üstüne çıkarak metanojenik bakteriler için toksik bir ortam oluşturmaktadır (Kothari ve diğ., 2014).

Pang ve diğ., (2008) yüksek gaz üretimi için C/N oranının 20 ile 30 arasında olması gerektiğini belirtmiştir. Bouallagui ve diğ., (2009) meyve ve sebze atıklarıyla yaptıkları çalışmada optimum C/N oranını 22 ile 25 arasında bulmuşlardır. Romano ve Zhang, (2008) ise soğan suyu ve atık su çamuru ile yaptığı çalışmada en uygun C/N oranını 15 olarak tespit etmişlerdir. Zhu ve Li, (2009) organik atıklarla yaptıkları kuru oksijensiz fermentasyon çalışmasında optimum C/N oranını 15 ile 18 arasında bulmuştur.

1.4.2.3. pH

pH değeri sulu çözeltilerde asit konsantrasyonunun belirlenmesinde kullanılır. Metanojenik bakteriler asidik ortamlarda büyüyemezler ve bu nedenle oksijensiz fermentasyon sistemlerinde pH kontrolü yapılır. Birçok araştırmacı oksijensiz fermentasyonun farklı aşamaları için pH değerlerini optimize etmiştir. Huber ve diğ., (1982) ile Yang ve Okos, (1987) metanogenez için optimum pH değerini 7 olarak saptamışlardır. Lee ve dig., (2009) metanogenez için en uygun pH aralığını 6,5 ile 8,2 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Park ve diğ. (2008) mutfak atıklarının termofilik asit fermentasyonunu incelediği çalışmasında asidojenler için en uygun pH değerini 6 ile 7 arasında bulmuştur. Metanojenler asit ortamlara karşı hassastırlar ve sağlıklı bir oksijensiz fermentasyon prosesi için metanojen aşamasında asit birikmesinden kaçınmak gerekir. Agdag ve diğ., (2007) kentsel katı atıklar ve endüstriyel çamur ile yaptıkları çalışmada uygun pH aralığını 7.0 ile 7.2 arasında tespit etmiştir.

1.4.2.4. Toplam katı miktarı

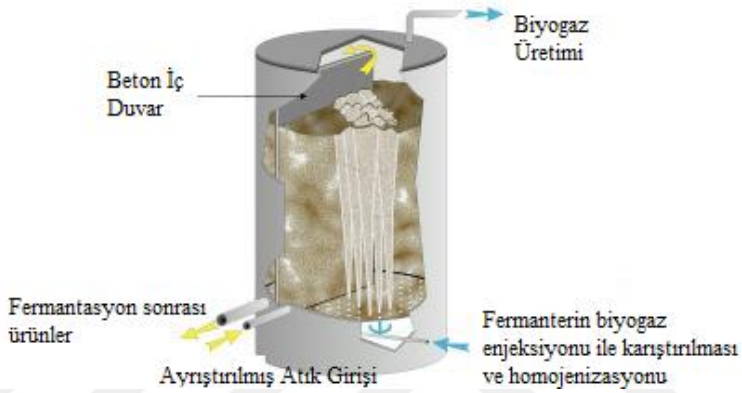
Oksijensiz fermantasyon süreçleri tek kademeli, çok kademeli veya dolur-boşalt tipi olabilir. Fermanter içindeki Toplam Katı (TK) miktarına göre oksijensiz fermantasyon süreçleri, düşük katı içerikli (<%10 TK), orta katı içerikli (%15-20 TK) ve yüksek katı içerikli (%22-40) olarak alt kategorilere ayrılabilir (Tchobanoglous ve diğ., 1993).

Islak fermantasyon, sindiricideki toplam katı içeriği %10 ve altı olduğu durumlarda uygulanır ve tipik kuru organik madde (KOM) yükleme miktarı 2-4 kg KOM/m^3gün'dür (Weiland, 2010). Bu tür uygulamalarda sindirici içi %90 civarında su olup belirli aralıklarla karıştırılır. Sindirici içindeki sulu malzeme pompalar ve boru hatları ile bir yerden diğer bir bölgeye sevk edilir. Gazı alınmış ve sindirilmiş ürün sulu veya seperatörde suyundan ayrıştırılıp kuru bir formda tarlalara gübre olarak serpilebilir. Islak fermantasyon tek ve iki kademeli olarak yapılabilir. Tek kademelide tüm oksijensiz fermantasyon aşamaları aynı fermanterde gerçekleşirken iki kademeli sistemlerde metanojen aşaması farklı bir fermanterde gerçekleşmektedir. Luo ve diğ., (2011) organik atıklarla iki ve tek kademeli ıslak fermantasyon yöntemi ile metan ve hidrojen üretim deneyleri yapmışlardır. İki kademeli proseste tek kademeliye göre %11 daha fazla enerji elde edildiğini ve organik yükleme miktarı arttırıldığında tek kademeli prosesin çalışmadığını ancak iki kademeli prosesin stabil olarak çalıştığını belirtmişlerdir. Vogt ve diğ., (2002) kentsel katı atıklarla yaptıkları çalışmada iki kademeli ıslak fermantasyon ile 0.36 m^3CH_4/kgUK elde etmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri bu değerin, tek kademeli ıslak fermentasyon tekniğine göre elde edilenden %40 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bouallagui ve diğ., (2005) meyve ve sebze atıkları ile yaptıkları çalışmada iki kademeli ıslak fermantasyon ile ortalama 0.42 m^3CH_4/kgUK metan elde etmişlerdir. Ayrıca tek kademeli sistemlerde yaşanan ani asitleşme olayının metanojen evresini kısıtladığını ve bu nedenle iki kademeli ıslak fermantasyon sistemlerinin daha avantajlı olduğunu belirtmiştir.

1.5. Endüstriyel Kuru Fermantasyon Tesisleri

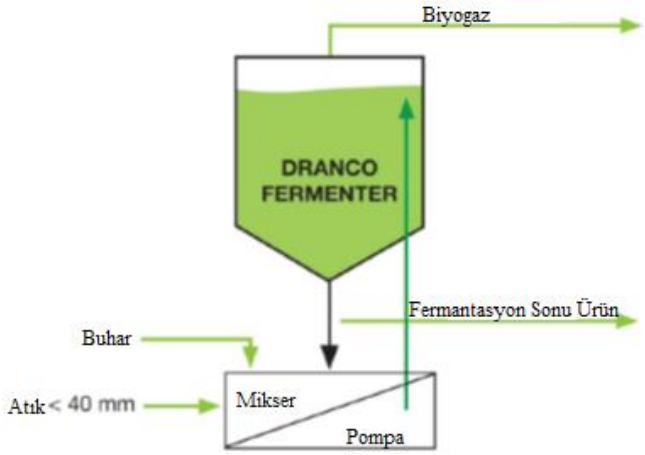
Endüstriyel kuru fermantasyon sistemleri, kentsel katı atıklar ve tarımsal atıklar gibi atık akımlarından biyogaz üretilmesi için kullanılmaktadırlar.

Valorga yönteminde reaktör, merkezde kısmi bir dikey duvarla bölünmüş dikey bir silindir şeklinde bir reaktördür (Şekil 1.7). Atık girdisi, reaktörün tabanına yakın bir girişten girer ve girişte tamamen zıt olarak yerleştirilmiş bir çıkıştan boşaltılana kadar dikey plakanın etrafında yavaşça hareket eder. Üretilen biyogazın, reaktörün altındaki bir enjektör ağı aracılığıyla enjekte edilmesi ile yükselen kabarcıklar, fermanterin içindeki atık karışımının pnömatik karışması sağlanır. Enjektörler tıkanmaya yatkın oldukları için düzenli bakım gerektirir (Verma, 2002).



Şekil 1.7. Valorga yöntemi (Verma, 2002)

DRANCO yönteminde, atık karışımı bir pompa vasıtası ile fermanterin içerisine, Şekil 1.8'de görüldüğü gibi, fermanteri delip içeri giren bir boru yardımı ile aktarılır. Daha sonra yerçekimi vasıtası ile fermante edilmiş ürünler fermanterin alt kısmından deşarj edilir. Üretilen biyogaz fermanterin üstünden alınır. Fermanterde herhangi bir karıştırma veya gaz enjeksiyonu bulunmamaktadır (Verma, 2002, URL-5).



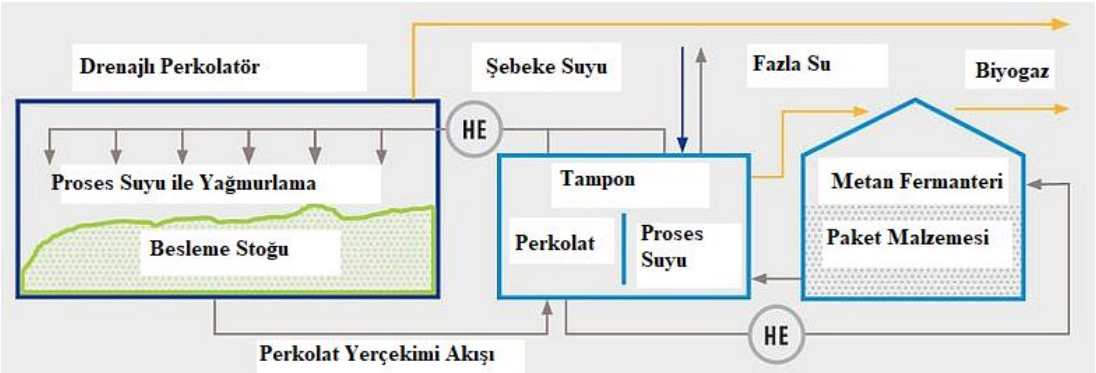
Şekil 1.8. DRANCO yöntemi (URL-5)

Kompogas yöntemi, DRANCO yöntemine benzemekle beraber farkı, fermanterlerin dikey değil yatay olmasıdır (Şekil 1.9). Karıştırma işlemi bir karıştırıcı ile sağlanır. Yaklaşık %25 TK içeren atık karışımları fermante edilebilir (Verma, 2002).



Şekil 1.9. Kompogas yöntemi (Moriarty, 2013)

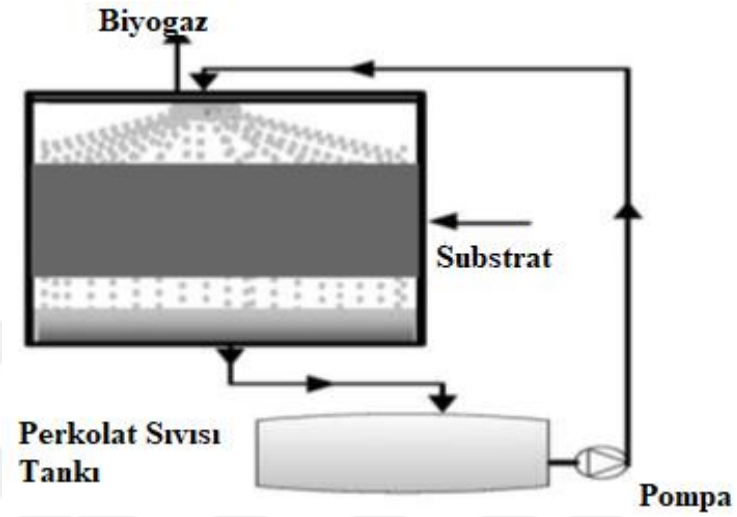
Gicon yönteminde atık karışımı, altı delikli yapıya sahip kapalı bir konteynıra yerleştirilir ve delikli yapıdan sızan sızıntı suyu, atığın üzerine resirküle edilir. Bir süre sonra bu sızıntı suyunun bir kısmı metan tampon bir tanka aktarılır ve burada metan fermanterinden gelen akım ile birleştirilir. Daha sonra bu karışımın bir kısmı kapalı konteynıra resirkülasyon için göderilir ve bir kısmı da metan fermanterine göderilir (URL-6).



Şekil 1.10 Gicon yöntemi (URL-6)

Bekon yönteminde, Avrupa'da geniş bir kullanım bulan ve %50 KM oranına kadar atık işleyebilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, sızıntı suyu tekrar besleme substratının

üzerine resirküle edilir. Fermantasyonun tamamlanmasından sonra fermanter açılır, yarısı boşaltılır ve hammaddenin yarısı aşı olarak bırakılır ve ardından fermanterin boşaltılan yarısına taze substrat konur ve fermantasyon süreci yeniden başlar (Nizami ve Murphy, 2010).



Şekil 1.11. Bekon yöntemi (Nizami ve Murphy, 2010)

1.6. Kuru Fermantasyon ile Biyogaz Üretim Çalışmaları

Perkolat suyu resirkülasyonunun, hayvan gübresinin kuru oksijensiz fermantasyonunda biyokütle ve substrat arası teması arttırması ile metan üretimini arttırdığı El-Mashad ve diğ., (2006) tarafından raporlanmıştır.

Hussain ve diğ., (2017) yerel bir kafeteryadan temin ettikleri yiyecek atıkları ile yaptıkları kuru fermantasyon deneylerinde pH değerinin 6-7 bandında olmasının yiyecek atıklarının hidrolizini hızlandırdığını belirtmiştir. Ayrıca artan resirkülasyon miktarı ile hidrolitik mikrobiyal popülasyonların ve enzimlerin daha iyi dağıtıldığı, fermanter içerisinde besinlerin daha iyi sevk edildiği ve pH stabilizasyonunun daha iyi olduğunu raporlamıştır.

Perkolat resirkülasyonu sadece garaj tipi kuru fermenterlerde kullanılmamaktadır. Bilgili ve diğ., (2007) laboratuvar tipi katı atık reaktörlerde kentsel katı atıklarla yaptıkları aerobik ve anaerobik degredasyon deneylerinde, sızıntı suyu resirkülasyonunun önemli bir parametre olduğunu vurgulamışlardır.

Riggo ve diğ., (2017b) yaptıkları çalışmada asidifikasyon aşamasındaki bir fermenterde perkolat resirkülasyonunun arttırılmasının, degredasyon kinetiklerini arttırdığını, olgunluğa ulaşmış fermenterlerde resirkülasyon sıklığının metan üretimini arttıracak şekilde ayarlanması gerektiğini belirtmiştir.

Xu ve diğ., (2014) yemek atıkları kullanarak yaptıkları deneylerde farklı sıvı:katı oranlarına sahip fermenterlerde farklı resirkülasyon tipleri ile (kesikli ve sürekli) oksijensiz sindirim deneyleri yapmışlardır. Sürekli resirkülasyon yapılan (5 ml/dk) ve 1:1 sıvı:katı oranına sahip fermenterlerde asidogenez için daha iyi ortam oluştuğu tespit edilmiştir.

Shin ve diğ., (2001) çoklu sızıntılı yatakların hidroliz, asidifikasyon ve son işlemlerde, oksijensiz çamur battaniyesi reaktörünün de metanojen safhasında kullanıldığı bir iki fazlı sistem geliştirmişlerdir. Yemek atıkları kullandıkları deneylerde metan üretimini 0,27 m^3/kgUK olarak bulmuşlardır. Kullanılan sistemin kaynak geri kazanımında ve atık stabilizasyonunda stabil, güvenilir ve etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Fermenterin içine yüklenen organik atık içerisinde belirli bölgelere aşılar konulur. Chanakya ve diğ., (1997) bu bölgeleri asidojenik ve metanojenik cepler olarak nitelendirmektedir. Veeken ve Hamelers, (2000) metanojenlerin aktivitesi, gelen uçucu yağ asitlerinin tükenmeyecek kadar düşük olmadığı sürece VFA'ların asidojenik ceplerden metanojenik ceplere aktarılmasının metan üretiminde pozitif bir etkisi olduğunu belirtmiştir. Martin, (1999) metanojenler asidik bölgelere aktarılırken asit inhibisyonuna uğrayacağından asitlerin (özellikle asetik asit) metan bölgelerine taşınmasının metanojen sürecinde daha etkili olduğundan bahsetmiştir.

Kush ve diğ., (2012) yaptıkları çalışmada metanojenler için optimum koşullarının sürecin başlangıç kısmında sağlanmasının önemli olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları deneyler göstermiştir ki sürekli perkolat (sızıntı suyu) spreylemek asitleşme riskini arttırmaktadır. Bir oksijensiz sindirim sürecini başlatırken spreyleme miktarını düşük tutmak Veenken ve Hamelers, (2000) ve Vavilin ve diğ., (2002, 2003) tarafından da önerilmektedir. Başlangıçta yapılan düşük miktardaki sıvı sirkülasyonu metanojenik alanların yayılmasına imkan vermektedir. Metanojenik alanlara gelen asitler tam olarak yıkılamazlarsa asidojenik alanlar reaktör içinde genişlemeye başlar.

Sonuç olarak yüksek kütle transferi sonrasında oksijensiz sindirim süreci inhibisyona uğrayabilir (Martin, 1999).

Metanojenik ve asidojenik alanlar arasındaki kütle transferinin arttırılması (Vavilin ve diğ., 2002) yüksek miktardaki perkolat sirkülasyonu ile ilişkilendirilebilir. Sonuç olarak hidroliz aşaması hız belirleyici ise perkolat sirkülasyonunun arttırılması önerilmektedir (Vavilin ve diğ., 2002, Veeken ve Hamelers, 2000). Ancak Kusch ve diğ., (2012) başlangıç ve stabil metanojen evreleri dahil hiçbir aşamada sürekli perkolat spreylemesinin bir faydasını görmediklerini belirtmişlerdir.

Li C. ve diğ., (2014) yaptıkları çalışmada farklı kuru madde miktarlarında ve farklı sıcaklıklarda organik atıklardan biyogaz üretim deneyleri yapmışlardır. Elde ettikleri bulgularda %30 kuru madde miktarına sahip fermanterde neredeyse hiç biyogaz üretimi olmadığı, %25 kuru madde miktarına sahip fermanterde biyogaz üretiminin 37 °C'de sınırlandığı ve tamamlanmadığı ancak 55 °C'lik fermanterde sürecin tamamlanabildiği belirtilmiştir. Bunun nedeninin %25 kuru madde miktarına sahip fermenterde 37 °C ile yapılan deneylerdeki su miktarının yetersiz kalması olarak belirtmişlerdir.

Ferna´ndez ve diğ., (2008) kentsel katı atıkların organik fraksiyonları ile yaptıkları deneylerde %20 ve %30 toplam katı konsatrasyonlarında kuru fermantasyon deneyleri yapmıştır ve en fazla metan üretimi %20 toplam katı içeriğine sahip fermenterde elde edilmiştir. Abbassi- Guendouz ve diğ., (2013) yaptıkları çalışmada %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 toplam katı oranlarında mezofilik şartlarda laboratuvar ölçekli bir sistemde yaptıkları kuru fermantasyon çalışmalarında, %10-%25 toplam katı oranlarındaki fermenterlerde yüksek metanojenik aktivite gözlenirken, %30 ve %35 toplam katı içerikli fermenterlerde uçucu yağ asidi inhibisyonu meydana geldiğini raporlamıştır. Benbelkacem ve diğ., (2015) tarafından Valorga tipi pilot ölçekli fermenterde yapılan çalışmada da benzer şekilde en uygun toplam katı içeriği % 20-22 olarak elde edilmiştir. Fernandez ve diğ., (2010) yaptıkları çalışmada %20 KMM ile yaptıkları deneylerden %30 KMM ile yaptıkları deneylere göre daha iyi sonuç aldıklarını belirtmişlerdir. KMM %30 olan sistemin daha uzun hidrolitik ve asidojenik safhalara gerek duyduğunu raporlamışlardır.

Kentsel katı atıkların organik fraksiyonlarının kompozisyonu belirli bir kentsel alanda farklı yer ve zamanda toplanmasına göre farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca içerdikleri farklı maddeler yiyecek bulunabilirliği, mevsimsel değişimler ve tüketim alışkanlıklarına göre değişebilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan kentsel katı atıkların organik fraksiyonları, gerçek atığı simule etme amacıyla taze yiyecek (çiğ veya pişmiş), restoran ve üniversite kafelerinden alınan yiyecek atıkları ve bazı durumlarda evsel toplanan çöplerden oluşmaktadır. Ayrıca restoran veya üniversite kafelerinden alınan yiyecek atıkları, kaynağında ayrıştırılmış ve toplama alanlarına ulaşan organik atıklarla aynı olmayabilmektedir (Alibardi ve Cossu, 2015). Bu nedenle tez kapsamında yapılan çalışmalarda organik atıklar, toplu olarak toplanabileceği bir pazar alanından temin edilmiştir.

Di Maria ve diğ., (2012) mezofilik şartlarda mekanik ayrılmış organik atık ve aşı karışımlarından kuru fermentasyon yöntemi ile biyogaz üretim deneyleri yapmıştır. Organik atık, mekanik olarak ayrıştırılmış kentsel katı atıkların organik kısmından aşı da daha önceki mezofilik oksijensiz fermantasyon deneylerinden elde edilmiştir. Atık:aşı oranının arttırılmasının sistemden elde edilecek enerji miktarını arttırdığı belirtilmiştir. Ancak atık:aşı oranının arttırılmasının sistemin yatırım masraflarını da arttırdığı bildirilmiştir.

Neshat ve diğ., (2017) hayvan gübrelerindeki düşük karbon oranının, daha yüksek karbonlu substratlarla birlikte fermente edilerek fermantasyon karakteristiklerinin iyileştirilebileceğini, ayrıca hayvan gübresinin alkali kapasitesinin yüksek olduğunu ve bu özelliği ile fermantasyon süreçleri için uygun bir substrat olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle tez kapsamında pazar atıkları ile inek gübresi ve tavuk gübresi karışımlarının kullanılması düşünülmüştür.

Li ve diğ., (2009) mutfak atıkları ve inek gübresi ile yaptıkları fermanstasyon deneylerinde, bu iki atık türünün birlikte fermantasyonundan, tek başına mutfak atıkları ile yapılan fermantasyona göre %44 daha fazla metan elde edildiği belirtilmiştir.

Forster-Carneiro ve diğ., (2007b) yaptıkları çalışmada mısır silajı, fermante edilmiş restoran atığı ve çeltik kavuzu karışımı, sığır gübresi, domuz gübresi ile fermente edilmiş çamur karışımı, domuz gübresi ve fermante edilmiş çamurdan oluşan altı farklı

aşıyı kullanarak ayrıştırılmış kentsel katı atıkların organik fraksiyonları ile termofilik koşullarda laboratuvar ölçekli fermanterlerde kuru fermentasyon deneyleri yapmıştır. Deneylerde aşı miktarı %25 ve toplam katı miktarı %30 olarak sabit tutulmuştur. En iyi sonuçları %43 uçucu katı giderimi ve 0,53 L CH_4/g UK metan üretimi ile fermente edilmiş çamur aşısı ile elde etmişlerdir.

Riggio ve diğ., (2017a) ahıl yatakları ile yaptıkları deneyler sonucunda, ahıl yatağının tek substrat olarak çiftliklerde kuru fermantasyonda kullanılabileceğini belirtmiş ve daha kolay bozunabilir substratlarla birlikte fermantasyon yapılmasının da uygun olabileceğini çalışmasında anlatmıştır.

Capson-Tojo ve diğ., (2017) yiyecek atıkları ve kağıt ile kuru fermantasyon deneyleri yapmıştır. Substrat:aşı oranının çok önemli olduğunu ve sadece 0,25 oranında çalışan fermanterlerde metan elde edildiğini belirtmiştir.

Yukarıda verilen literatür bilgilerine göre iki kademeli ıslak fermantasyon sistemi biyobozunur atıkların bertaraf edilmesi için uygun bir proses olarak görülmektedir. Ancak proje ekibi tarafından 2008-2011 yılları arasında İZAYDAŞ'ta yapılan organik atıkların ıslak fermantasyonu deneylerinde pompalarda ve hatlarda yoğun tıkanma problemleri gözlenmiştir. Bunun nedeni Kocaeli'de üretilen organik atıkların yüksek kum ve katı partikül içeriği olarak saptanmıştır. Islak fermantasyon sisteminde operasyonel sıkıntıların yaşanmasından dolayı kuru fermantasyon sisteminin organik atıkların bertarafında daha başarılı bir sistem olacağı düşünülmektedir.

Kutu tip kuru fermenterlerde aşı ile substrat fermenter içine katı olarak konulup sızıntı suyu tabandan alınıp tavandan spreyleme şeklinde resirküle ettirilmektedir. Aşı genelde bir önceki fermantasyondan kalan ürün olmakla beraber yeni başlatılan fermantasyonda metanojenik bakterilerin optimal koşullarda olmasını sağlarken uçucu yağ asidi birikimi nedeniyle sürecin inhibe olmasını da engellemektedir (Schievano ve diğ., 2010). Bunun yanında, fermentere sadece substratın yüklenip aşının sıvı halde tavandan spreylendiği çalışmalar da mevcuttur. Bu tarz bir yaklaşımla Michele ve diğ., (2015) fermenter içerisindeki katı aşı miktarının azaltılarak daha çok substrat kullanılabildiğini ve bunun süreci pozitif yönde etkileyebileceğini belirtmiştir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, bu tez kapsamında kentlerde üretilen organik atıklardan (sebze ve pişmiş yemek atıkları), farklı hayvan gübreleri (inek gübresi, endüstriyel tavuk gübresi ve evsel tavuk gübresi), farklı organik atık/hayvansal gübre oranı karışımları ve farklı resirkülasyon miktarlarında ile biyometan üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Kuru fermantasyon deney sistemi İZAYDAŞ çöp sızıntı suyu arıtma tesisine yakın bölgede kurulduktan sonra ön test ve denemeleri yapılmıştır. Aşağıda detayları verilen deney planı oluşturulduktan sonra organik atıklar Kocaeli'de bulunan yerel bir pazardan ve İZAYDAŞ yemekhanesinden, hayvansal gübreler de yerel çiftçilerden toplanmıştır. Deney planına uygun hazırlanan karışımlar kuru fermantere yüklenerek deneyler tamamlanmıştır. Gerek ilk yükleme, gerekse deney süresince alınan numunelere ilgili standartlara göre analizler yapılmıştır.

2.1. Deney Planı

Deney planı; organik atık kompozisyonunun, hayvansal gübre/organik atık oranının, perkolat suyu resirkülasyon miktarının, hayvansal gübre türünün ve alkali işlemlerin kuru fermantasyon sürecine etkilerinin belirlenebileceği şekilde tasarlanmıştır. Tüm deneyler mezofilik şartlarda (36±2 °C) gerçekleştirilmiştir. Fermanterdeki (birinci deney hariç) toplam katı oranı %10 (±2) ve parçacık boyutu <5cm olarak belirlenmiştir (Arslan, 2017). Gerçekleştirilen ilk deneylerde resirkülasyon miktarı bir resirkülasyonda maksimum 39 litre ve günde 12 resirkülasyon olarak, daha önce yapılan ön deneyler ve deney setinin tasarım parametreleri ışığında belirlenmiştir.

Organik atıkların kuru fermantasyon sürecinde çeşitli çalışma koşulları altındaki davranışını incelemek için Tablo 2.1'de verilen deney planı oluşturulmuştur.

Tablo 2.1. Deney planı

Deney No	Organik Atık (% Yaş Ağırlık)	Hayvan Gübresi (% Yaş Ağırlık)	Resirkülasyon Sıklığı (Günde)
1	%85 Sebze	%15 İnek	12
2	%50 Sebze %35 Yemek	%15 İnek	12
3	%75 Sebze	%25 İnek	12
4	%65 Sebze	%35 İnek	12
5	%65 Sebze	%35 İnek	6
6	%65 Sebze	%35 İnek	1

Tablo 2.1.(Devam) Deney planı

Deney No	Organik Atık (% Yaş Ağırlık)	Hayvan Gübresi (% Yaş Ağırlık)	Resirkülasyon Sıklığı (Günde)
7	%96,5 Sebze	%3,5 Tavuk (Endüstriyel Çiftlik)	12
8	%96,5 Sebze	%3,5 Tavuk (Evsel Yetiştirilen)	12
9*	%85 Sebze	%15 İnek	12
10**	%50 Sebze %35 Yemek	%15 İnek	12

*Birinci deneyde gözlenen problemlerden dolayı alkali işlem yapılmıştır.
**İkinci deneyde gözlenen problemlerden dolayı alkali işlem yapılmıştır.

Li ve diğ., (2017) yemek atıklarıyla yaptıkları deneylerde farklı karbonhidrat, protein ve yağ oranlarında yüksek metan ve süreç stabilitesinin belirlenmesi amacıyla biyogaz üretim deneyleri yapmışlardır. Karbonhidrat-protein-yağ oranının 1,89'dan yüksek olmasının (karbonhidrat 8,3'ten yüksek, protein %5'ten ve yağ 5,6'dan düşük) stabil bir süreç sağlanmasının, yüksek metan üretiminin sağlanmasını ve fermantasyon süresinin kısalmasını sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca yaptıkları çalışmada, substrat karakteristiklerindeki değişiklikler, aşı ve fermantasyon parametrelerinin (sıcaklık, bekleme süresi, fermanter tipi vb.) çalışıldığını ancak organik kompozisyonun biyogaz üretim sürecini nasıl etkilediği hakkında çok az bilgi olduğunu vurgulamıştır.

İlk aşamada yukarıda bir örneği verilen literatür taramaları sonucunda deneylerde kullanılacak organik atık türünün belirlenmesi amacıyla %15 inek gübresi ve %85 sebze atığı (15/85) kullanılan birinci deney ve %15 inek gübresi %50 sebze atığı ve %35 yemek atığı (15:50:35) kullanılan ikinci deney ile başlanmıştır. İki deneyde de metanlaşma sağlanamaması üzerine, öncelikle hayvansal gübre/organik atık oranının belirlenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Deneylerdeki atık türünü sabit tutmak ve bulunabilirliğinin daha fazla olduğu için deneylere sebze atığı ve inek gübresi ile devam edilmesine karar verilmiştir.

Forster-Carneiro ve diğ., (2008) %20, %25 ve %30 KMM ve %20 ile %30 aşı oranlarıyla yaptığı ve yemek atığı ve atık su arıtma çamuru kullandığı çalışmada en iyi performansı %20 KMM ve %30 aşı oranı ile almıştır. Arslan, (2017) yaptığı çalışmada 50:50, 25/75, 75:25 gibi farklı oranlarda ve farklı toplam katı içeriklerinde kentsel katı atıkların organik fraksiyonları, etli tavuk gübresi ve yumurtalık tavuk gübresi ile

biyokimyasal metan potansiyeli testleri yapmış ve en iyi sonucu %75 yaş tavuk gübresi ve %25 kentsel katı atıkların organik fraksiyonunda elde etmiştir. Rico ve diğ., (2015) mandıra hayvan dışkıları ile yaptıkları kuru fermantasyon deneylerinde yüksek aşı:substrat oranlarının sistemi inhibisyona karşı koruduğunu belirtmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisinin belirlenmesi amacıyla %25 inek gübresi %75 sebze atığı (25/75) ve kullanılan üçüncü deney ve %35 inek gübresi %65 sebze atığı (35/65) ve kullanılan dördüncü deneye başlanmıştır. Böylece birinci (15/85), üçüncü (25/75) ve dördüncü (35/65) deneylerden elde edilen veriler ile inek gübresi:organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisi incelenmiştir.

Rico ve diğ., (2015) yaptıkları mandıra hayvan dışkıları ile yaptıkları çalışmada, perkolat resirkülasyonunun sık aralıklarla yapılmasının, kuru fermantasyon sürecinin hızını ve stabilitesini arttırdığını raporlamıştır. Pezzola ve diğ., (2017) yaptıkları çalışmada farklı resirkülasyon miktarlarının kuru fermantasyon sürecine etkisini incelemiştir. Resirkülasyon miktarı olarak günde bir defa, günde iki defa (12 saatte bir) ve günde dört defa (6 saatte bir), her resirkülasyonda 45 dk olmak üzere kuru fermantasyon deneyleri yapmışlardır. Ayrıca kontrol olması için bir deneyi de resirkülasyon olmadan gerçekleştirmişlerdir. Artan perkolat resirkülasyonu miktarının biyogaz üretimini, UYA akümülasyonununa yer vermediği için süreç stabilitesini ve katı biyokütle içindeki proteinlerin yıkım hızını arttırdığını belirtmişlerdir. Yap ve diğ., (2016) domuz ahıl yatakları ile yaptıkları çalışmada kesikli ve doldur-boşalt usulü resirkülasyonun kuru fermantasyon sürecine etkisini araştırmışlardır. Kesikli çalışmada resirkülasyon pompası her yirmi dakikada bir beş dakika çalışmıştır. Doldur-boşalt usulü çalışmada ise 20 dakikada bir toplanan tüm perkolat suyu resirküle edilmiştir. Fermantasyon performansı olarak iki resirkülasyon türü arasında önemli bir fark bulunmadığını ancak doldur-boşalt usulü olan resirkülasyon şeklinde daha fazla katı partikül hareketlendirildiği için operasyonel problemler çıkardığını raporlamışlardır.

Perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisinin belirlenmesi amacıyla %65 sebze atığı ve %35 inek gübresi kullanılan ve 6 resirkülasyon yapılan beşinci deney ile %65 sebze atığı ve %35 inek gübresi kullanılan

ve 1 resirkülasyon yapılan altıncı deneye başlanmıştır. Böylece dördüncü, beşinci ve altıncı deneylerde perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisi incelenmiştir.

Hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisinin belirlenmesi amacıyla %96,5 sebze atığı ve %3,5 endüstriyel tavuk gübresi kullanılan yedinci deney ve %96,5 sebze atığı ve %3,5 evsel yetiştirilen tavuk gübresi kullanılan sekizinci deneylere başlanmıştır. Tavuk gübresinin fermanterdeki oranının % 3,5 olmasının nedeni partiküllü yapısı ve fermanter içindeki toplam katı (TK) miktarının %10'da tutulmak istenmesidir. Yapılan deneyler akabinde elde edilen veriler ışığında, endüstriyel tavuk gübresinin resirkülasyon miktarı çok yüksek olan bu tür sistemlere uygun olmaması ve evsel yetiştirilen tavuk gübresinin de bulunabilirliği çok zor olması nedeniyle tavuk gübresi denemelerinde, hayvansal gübre/organik atık oranının ve resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisi ile ilgili deneylere devam edilememiştir.

Birinci ve ikinci deneyde metan üretiminin istenilen seviyelerde olmaması nedeni ile fermantasyon sürerken alkali işlem yapılıp alkalinitenin arttırılması yoluyla pH değerini 7 civarına çekerek metan üretiminin arttırılması planlanmıştır. Bu nedenle birinci deneye (15/85) NaOH eklemesi yapılarak (Li ve diğ., 2009) dokuzuncu deney olarak, ikinci deneye de yanmış kireç ve sodyum bikarbonat (Stafford ve diğ., 1981, Cysneiros ve diğ., 2012) eklenerek onuncu deney olarak devam ettirilmiştir.

2.2. Organik Atıklar ve Hayvansal Gübrelerin Karakteristikleri

Deneylerde kullanılan organik atıklar yerel bir pazardan, inek gübresi ve tavuk gübresi yerel bir çiftçiden, endüstriyel tavuk atığı da yerel bir tavuk işletmesinden temin edilmiştir. Kuru Madde Miktarı (KMM), Uçucu Organik madde (UOM), Toplam Kjeldal azotu (TKN) ve Toplam Organik Karbon (TOK) ölçümleri deneylerin başında ve sonunda alınan numunelerden elde edilmiştir. Tablo 2.2'de organik atıkların karakterizasyonları görülebilir. Uçucu Yağ Asitleri (UYA), alkalinite, pH ve biyogaz metan içeriği teknik bir sorun olmadığı sürece haftada bir ölçülmüştür.

Tablo 2.2. Organik atıkların karakterizasyonları

Deney No	Atık Türü	KMM (%)	UOM (%)	TKN (yaş,mg/kg)	TOK (yaş,mg/kg)
1	Sebze	11,2	81,89	4302,9	50096
	İnek Gübresi	16,5	85,01	6102,3	91550
2	Sebze	11,2	81,89	4302,9	50096
	Yemek Atığı	26,71	95,81	8049,8	133051
	İnek Gübresi	16,5	85,01	6102,3	91550
3	Sebze	7,9	67,19	2788	33727
	İnek Gübresi	16,51	84,59	3763	79935
4	Sebze	8,83	77,2	3137,5	42816
	İnek Gübresi	14,94	83,37	3692,4	68778
5-6	Sebze	9,65	86,13	2722	30914
	İnek Gübresi	15,36	85,28	4504	70113
7	Pazar Atığı	8,03	76,56	3520,9	41255
	End. Tavuk Gübresi	61,73	23,34	8491,2	87717
8	Pazar Atığı	9,65	86,13	2722	30914
	Evsel Tavuk Gübresi	66,73	58,97	34456	190783

2.3. Analitik Metotlar

Fermantasyon sürecinin izlenmesi için bu bölümde verilen analitik parametreler takip edilmiştir (Parkin ve Owen, 1986).

2.3.1. Uçucu yağ asitleri

Uçucu yağ asidi oluşumu oksijensiz fermantasyon süreçlerinde önemli bir parametredir. Metanojenler UYA'ları tüketerek metan oluşturmaktadırlar. Ancak yüksek UYA konsantrasyonları pH seviyesini düşürerek metanojenik aktiviteyi inhibe edebilir. Bu nedenle oksijensiz fermantasyon süreçlerinde UYA takip edilmesi gereken parametrelerden bir tanesidir (Jha ve diğ., 2011).

UYA değerinin tayini perkolat sıvısında gerçekleştirilmektir. Uçucu yağ asidi ölçümü Merck kit yöntemi ile İZAYDAŞ laboratuvarlarında yapılmıştır. UYA ölçümü Merck

marka test kitleri ile gerçekleştirilmiştir. Numune öncelikle 0,45 mikronluk süzgeç kağıdından geçirilerek, UYA test kitini üzerine 750 mikrolitre QA1 ve 500 mikrolitre QA2 eklenir ve ardından 500 mikrolitre numune ilave edilerek test kiti 1000C sıcaklıktaki termoreaktörde 15 dakika ısıtma ve parçalama işlemine tabi tutulmaktadır. Sonra dikkatlice suyun altında soğutulmalıdır. Ardından test kitine 1'er ml QA3, QA4, QA5 ilave edilir ve çalkalanır. 1 dakika bekledikten sonra test tüpünün dışı temizlenip Pharo100 Spectroquant spektrofotometre cihazına yerleştirilmekte ve cihaz ekranından ölçüm sonucu mg/lt cinsinden okunmaktadır.

2.3.2. Alkalinite ve pH

Uygun pH kontrolü için yeterli alkalinite şarttır. Alkalinite, pH'da hızlı değişimi önleyen bir tampon görevi görür. Enzimatik aktivite veya fermanter performansı pH'dan etkilenir. Asit oluşturan bakterilerin kabul edilebilir enzimatik aktivitesi, pH 5,0'ın üzerinde gerçekleşir, ancak metan oluşturan bakterilerin kabul edilebilir enzimatik aktivitesi, pH 6,2'nin altında gerçekleşmez. Metan oluşturan bakteriler dahil çoğu anaerobik bakteri, 6,8 ila 7,2 arasında bir pH aralığında iyi performans gösterir. Anaerobik bir fermanterde pH, başlangıçta uçucu asitlerin üretimi ile düşecektir. Bununla birlikte, metan oluşturucu bakteriler uçucu asitleri tükettikçe ve alkalinite üretildikçe, fermanterin pH'ı artar ve sonra stabilize olur.

Fermanter stabilitesi, yüksek alkalinite konsantrasyonuyla arttırılabilir. Alkalilikte normal çalışma seviyesinin altına düşmesi, beklemede olan bir başarısızlığın ve olası bir fermanter arızasının habercisi olarak kullanılabilir. Alkalinitedeki azalmaya; metan oluşturan bakterilerin organik asitleri metan haline getirememesinden dolayı organik asitlerin birikmesi, organik asitlerin anaerobik fermantere birden boşaltılması, metan oluşturan bakterilerin aktivitesini inhibe eden atıkların varlığı neden olabilir. Alkalinitedeki azalma, pH'daki ani düşüşten önce gerçekleşir.

Her ne kadar anaerobik fermanter verimliliği pH 6,8 ila 7,2 aralığında tatmin edici olsa da, en uygun pH aralığı 7,0 ila 7,2 arasıdır. 6'nın altındaki veya 8'in üzerindeki pH değerleri kısıtlayıcıdır ve metan oluşturan bakteriler için toksiktir. Kararlı bir pH'ı korumak için yüksek bir alkalinite seviyesi gerekir.

Anaerobik fermantere beslenen substratlar alkali bileşikleri veya alkali bileşiklerin öncülerini içermiyorsa, alkalinite ile pH için kararlı ve kabul edilebilir değerler sağlamak için fermantere alkalinite eklenmelidir. Ayrıca, asit üretim hızı metan üretim oranını aşıyorsa, alkalinite ilave edilmelidir. Metan üretiminden daha yüksek bir uçucu asit üretimi oranı genellikle başlatma, aşırı yükleme, uygun fermanter sıcaklığının kaybı ve inhibisyon sırasında ortaya çıkar

Fermanterin pH'ı, fermanterin alkalinitesinden daha kolay ve hızlı bir şekilde belirlenebilmesine rağmen, pH, sadece fermanterde nelerin olup bittiğinin bir göstergesidir, oysa alkalinitedeki değişiklikler fermanterde neler olduğunu belirtir. Fermanterin alkalinitesi, alkalinite ilavesinin veya düzeltici önlemlerin gerekli olup olmadığını gösterir (Gerardi, 2003).

pH ölçümü Hach Lange taşınabilir el tipi cihaz ile yapılmıştır.

Alkalinite değerinin tayini perkolat sıvısında gerçekleştirilmektir. Bu deney çalışmasında SM 2320 B:2005 yöntemi kullanılır. Numunede öncelikle pH değerine bakılır. Numunenin pH değeri 8'den büyük ise fenolftaleyn alkalinitesi (p-alkalinite) bakılmaz.

Fenolftaleyn Alkalinitesi (FA); numunenin pH değeri 8,3'e düşürülmektedir. Bu işlem ayarlanmış sülfürik asit eklenmesi ile gerçekleştirilir. Harcanan sülfürik asit sarfiyatından fenolftaleyn alkalinitesi (p-alkalinitesi) bulunmaktadır. Fenolftaleyn alkalinitesi Denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$FA\ mg\ CaCO_3/L = AxNxFx50x1000/V(numune\ hacmi) \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de A:Kullanılan asit, ml, N: Standart asidin normalitesi ve F: Asidin faktörünü temsil etmektedir.

Toplam Alkalinite (TA); Numunenin pH değeri 4,5'e düşürülmektedir. Bu işlem ayarlanmış sülfürik asit eklenmesi ile gerçekleştirilir. Harcanan sülfürik asit sarfiyatından toplam alkalinite Denklem (2.2) ile (metil orange alkalinitesi) bulunmaktadır.

$$TA = AxNxFx50x1000/V(numune\ hacmi) \quad (2.2)$$

2.3.3. Biyogaz metan içeriği

Sistemde üretilen biyogazın metan içeriğinin ölçülmesi için Geotech Gem2000 plus ve MRU Optima 7 cihazları kullanılmıştır. Üretilen biyogaz içerisindeki metan miktarı ölçülerek kümülatif metan üretim eğrileri çıkarılabilmekte ve kuru fermantasyon süreci takip edilebilmektedir.

2.3.4. Kuru madde miktarı ve uçucu organik madde

Fermanterlere yüklenen atıkların kuru madde miktarı TS 9546 EN 12880, uçucu organik madde miktarı da TS EN 12879 standartlarında İZAYDAŞ ve KOÜ Makine Mühendisliği laboratuvarlarında ölçülmüştür.

Kuru madde miktarı bulunması için nem miktarı bulunmaktadır. Numune alınmadan önce dara alınmış ve sonra numuneden 2-2,5 g tartılmıştır. Numunedeki su miktarını gidermek amacıyla etüve konulur. Etüvün sıcaklığı 105 °C olup ± 5 °C sıcaklık değişimi hassasiyeti bulunmaktadır. Numune etüvde sabit tartıma kadar tutularak ölçüm yapılmaktadır.

Kuru Madde(%)=(Kurutma ağırlığı-Dara/Kurutma Ağırlığı)x100

2.3.5. Toplam organik karbon ve toplam Kjeldhal azotu

Toplam organik karbon (TOK) TS EN 15936 ve toplam kjeldhal azotu (TKN) TS EN 16169 standartlarında İZAYDAŞ laboratuvarlarında ölçülmüştür. TOK ölçümü Shimadzu TOC-VCPH marka cihaz ile yapılmıştır.

2.3.6. Toplam Amonyak Azotu

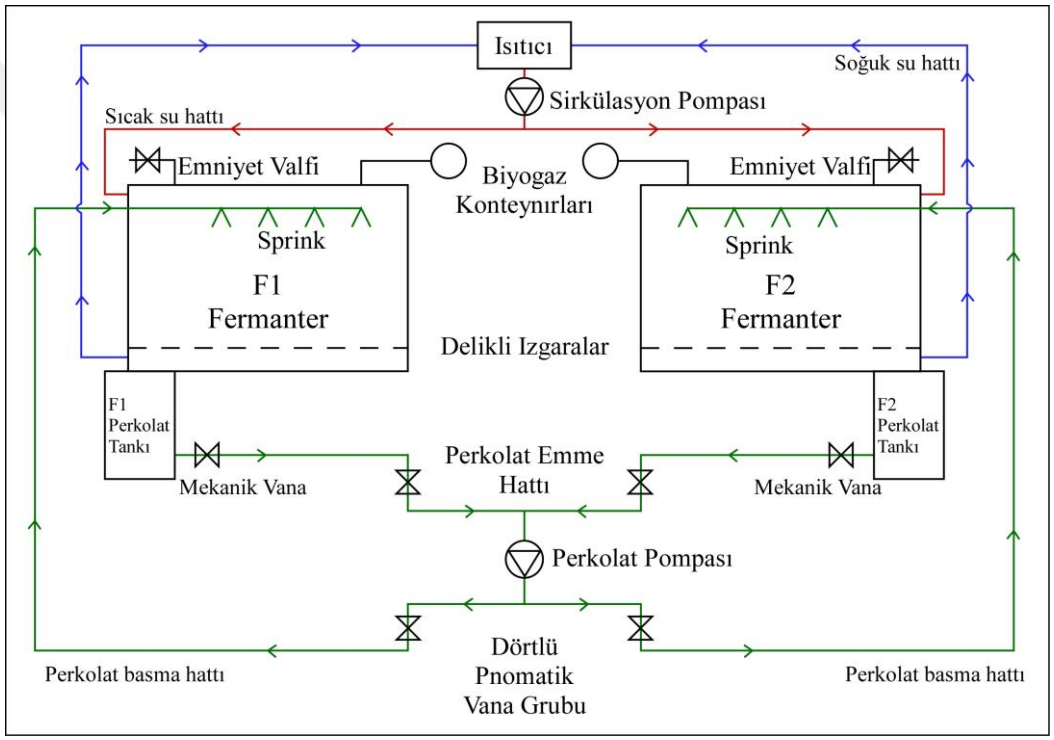
Toplam Amonyak Azotu ölçümü (TAA), Antezana ve diğ. (2016) yaptığı gibi APHA Standart Metot 4500-NH_3 B ve APHA Standart Metot 4500-NH_3 C yöntemine göre ölçülmüştür.

Bu yöntemde, fenol türlerine numunenin içeriğine göre 25-250 ml numune alınıp ve 500 ml'ye saf su ile tamamlanmaktadır. Üzerine 25 ml borat tampon çözeltisi eklenmelidir ve 6N NaOH ile pH ayarı 9,5 e ayarlanmaktadır. Hazırlanan borik asit çözeltisinden 50 ml alınıp, 500 ml'lik mezura konulur. Fenol tüpü damıtma işlemi için

FOSS cihazına alınır ve distilat 200 ml olarak 500 ml'lik mezüre toplanır. Saf su ile 500 ml'lik mezür tamamlanmaktadır. Bu işlemler sonra ayarlı 0,02 N sülfürik asit ile titrasyon gerçekleştirilir. Renk değişimi mor menekşeye döndüğünde işlem tamamlanmıştır. Titrasyon sonucu harcanan titrant miktarı (V_B) not edilir. Tüm bu işlemler blank için de eş zamanlı gerçekleştirilmektedir ve blank için hacim (V_N) not edilir. Amonyak Azotu Denklem 2.3 ile hesaplanır

$$\text{Hesaplama} = (V_N - V_B) \times 280 \times H_2SO_4(\text{faktör}) / V(\text{numune hacmi}) \quad (2.3)$$

2.4. Kuru Fermantasyon Sistemi



Şekil 2.1. Kuru fermanter sistemi diyagramı

Kuru fermantasyon sisteminin şeması Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu şemada yeşil çizgiler perkolat hattını, kırmızı ve mavi çizgiler sıcak ve soğuk su hatlarını temsil etmektedir. Bir kuru fermantasyon seti iki fermanterden oluşmakta olup bunlar tek bir perkolat pompasına bağlıdır. Tesiste bunun gibi toplam üç adet fermantasyon seti bulunmaktadır.

Perkolat pompası, emme ve basma hatlarına toplam dört adet pnomatik vana ile bağlanmıştır. Perkolat hattında kullanılan borular polipropilen malzemeden olup DN 50 çapındadır. Aynı şekilde kullanılan diğer tesisat malzemeleri olan manuel vanalar,

pnomatik uyartımlı vanalar, flanşlar, kompansatörler ve koleler de DN 50 çapındadır. Flanş bağlantılarında klinger ve kauçuk contalar kullanılmıştır ve kauçuk contaların daha iyi çalıştığı tespit edilmiştir. Flanş bağlantıları yapılırken kullanılan cıvata bağlantıları, çalışma esnasında titreşimden dolayı gevşeme yapmış, bu nedenle cıvata bağlantılarında Loctite 243 orta mukavemetli vida sabitleyici kullanılmıştır.

Perkolat pompası, pnomatik vanalar ile F1 ve F2 kuru fermanterlerinin sızıntı sularını (perkolat) kendi içlerinde resirküle edilebilmektedir. Ayrıca bu sistem ile F1'de konulan bir sıvıyı F2 kuru fermanterine de basabilmektedir. Bu konfigürasyon, fermanterler arası sıvı geçişinin sağlanabilmesi için yapılmıştır. Perkolat hattındaki manuel vananlar bir arıza durumunda içerideki gaz ortamı kaybolmadan hat üzerinde tamirat işlemi yapılmasına olanak vermekle birlikte, drenaj için de kullanılabilmektedir. Şekil 2.2'de yapımı devam ederken kuru fermanter sistemi görülebilir.



Şekil 2.2. Kuru fermanter sistemi

Fermanterlerin içerisinde sıcaklık ölçümü için PT100 rezistans termometreleri kullanılmıştır. Fermanter içerisinde okunan sıcaklık değeri, kuru fermanter sistemini işleten SCADA sistemine gönderilmektedir. Bu sistem, okunan sıcaklık değerini, önceden ayarlanmış fermanter sıcaklık değeri ile karşılaştırmakta ve eğer fermanter sıcaklığı düşük ise, ısıtma sistemini devreye sokmaktadır.

Fermanterin ısıtma sistemi sıcak ve soğuk su hatları ile bunların kolektörleri, 8 kW gücünde bir termosifon, bir sirkülasyon pompası ve selenoid valf gurubundan oluşmaktadır. Termosifonda ısıtılan sıcak su, sirkülasyon pompası aracılığı ile fermanterlerin sıcak su ceketlerine gönderilmektedir. Burada gerçekleşen ısı transferinden sonra soğuyan su, soğuk su hattından termosifona geri dönmektedir. Soğuk su kolektöründe selenoid valf gurubu bulunmaktadır. Normalde kapalı

konumda bulunan bu valfler, SCADA sisteminden gelen uyartım ile açılarak sirkülasyona izin vermektedir. Isıtma sisteminin hassasiyeti ±2 °C'dir.

Kuru fermanterler 0,8 m yüksekliğinde, 0,7 m eninde ve 1,2 metre boyundadır. Fermanterlerde 100 kg'lık bir atık karışımı ile deney yapılabilmektedir. Pekolat tankının çapı 0,3 m ve boyu 0,8 m olmakla beraber ortalama 55 L hacmindedir.

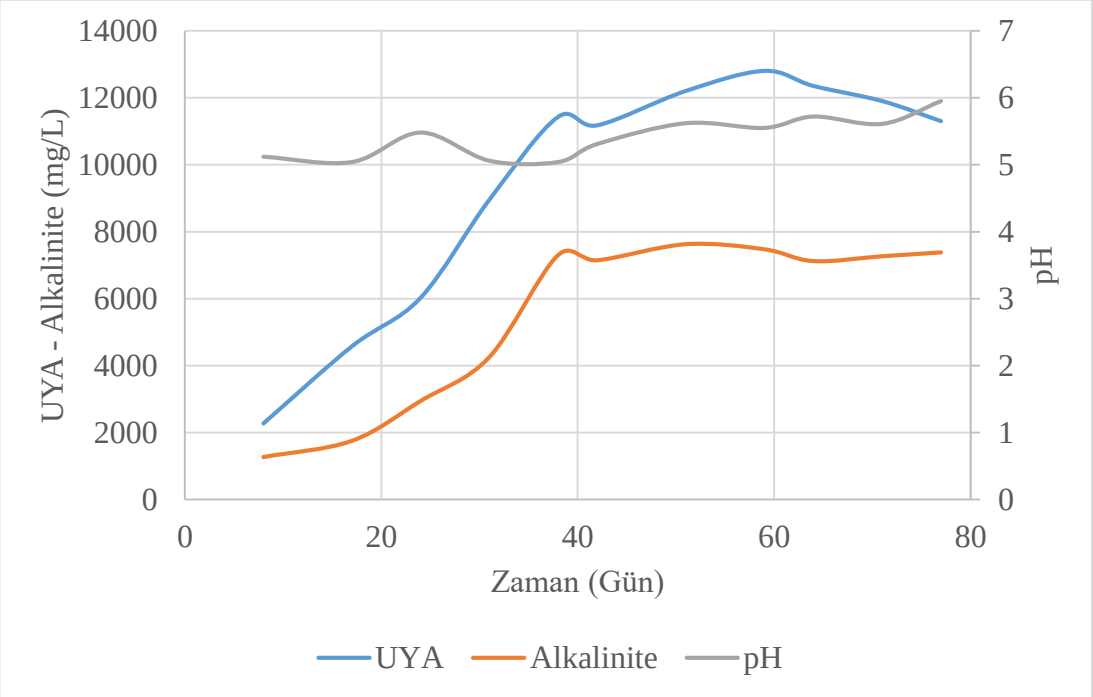
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Bulgular

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda organik atıklar ve hayvansal gübreler ile kuru fermantasyon yöntemi ile biyometan üretim çalışmaları yapılmış ve hayvansal gübre/organik atık oranı, perkolat suyu resirkülasyon miktarı, hayvansal gübre türü ve organik atık türü faktörlerinin biyometan üretimine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan deneyler Tablo 2.1'de verilmiştir.

3.1.1. Birinci deney

Birinci deneyde fermantere % 85 sebze atığı ve % 15 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, atık/gübre oranının kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.

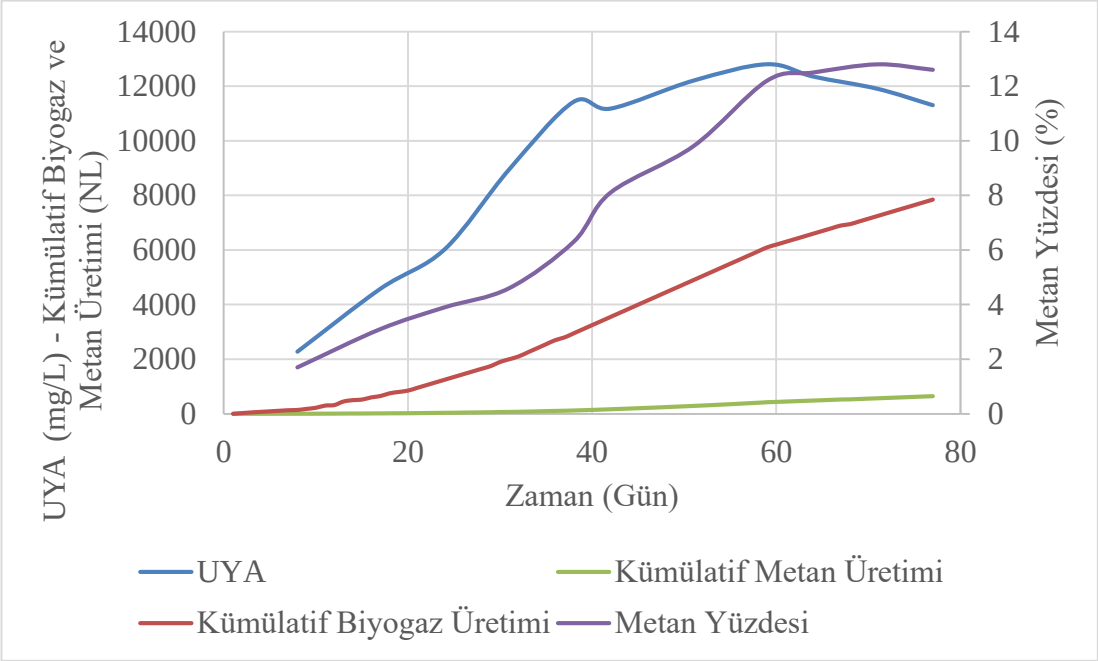


Şekil 3.1. Birinci deney UYA, alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.1'de birinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir. Deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı neredeyse lineer olarak artmaya başlayıp 38. günde 11425 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 59. günde en yüksek değeri olan 12800 mg/L seviyesine ulaşmıştır. Deneyin sonralarına doğru bir azalma göstererek 77. Günde 11300 mg/L seviyesine gerilemiştir. Deneyin 38. Gününden sonra uçucu yağ asitleri en fazla %12 artış göstermiş ve neredeyse stabil kalmıştır.

Alkalinite değeri ilk 38 gün artarak 7297 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 7100 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

Deney başlatıldığında pH değeri 5,12 olup deney süresince pH seviyesi 5-6 aralığında seyretmiştir.



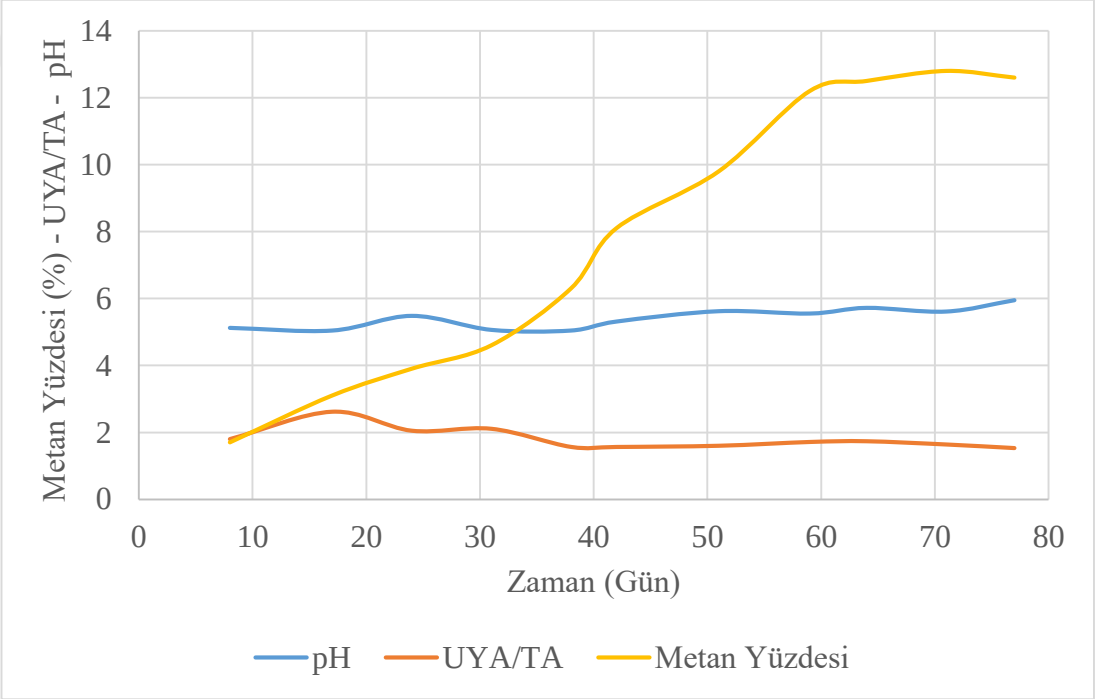
Şekil 3.2. Birinci deney UYA, kümülatif biyogaz ve metan üretimi, metan yüzdesi grafiği

Şekil 3.2'de birinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Deney süresince biyogaz üretimi sürekli artmaya devam ediyorken metan üretimi bu artışa paralellik göstermemiştir.

Metan yüzdesi deney başlangıcından 59. güne kadar nerdeyse lineer bir artış göstermiştir ve metan yüzdesi % 12,2 seviyesine kadar artmıştır. Daha sonra deney sonuna kadar % 12 seviyelerinde stabil kalmıştır.

Deneyin süresince elde edilen kümülatif metan üretimi 643 L olmuştur.

Metan üretiminin çok az olmasının nedeni, bu süreçteki pH değerinin 5-6 seviyelerinde olması ve dolayısı ile üretilen UYA'ların metana dönüştürülememesidir. Biyogaz üretim süreci asit safhasından bazik metanojen safhasına geçememiştir (Weiland, 2010).



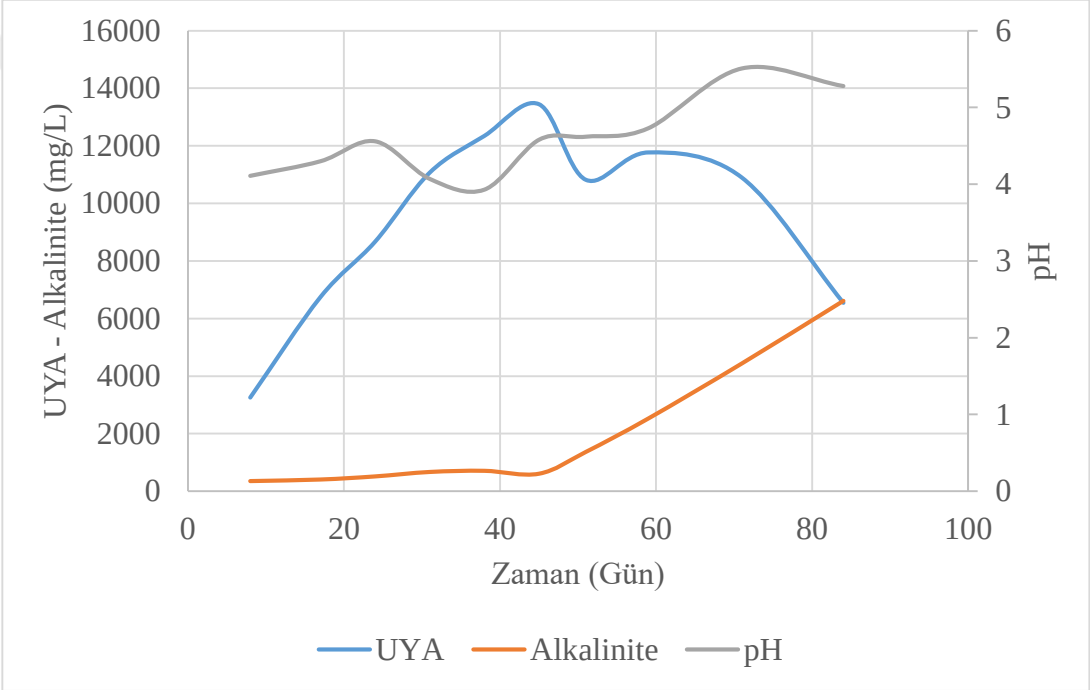
Şekil 3.3. Birinci deney pH, UYA/TA ve metan yüzdesi grafiği

Şekil 3.3'te birinci deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH, kümülatif metan üretim grafiği görülmektedir. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 1,8 değerinde olup deney sonunda 1,53 değerine kadar düşmüştür. Bu aralıkta pH 5-6 seviyelerinde seyretmektedir. Metan üretimi olsa dahi Şekil 3.2'de görüldüğü gibi istenilen seviyelere ulaşmamıştır. Aktif metan üretim süreci gerçekleşmesi için UYA/TA oranının 0,25-0,5 aralığında olması gerekmektedir (Di Maria ve diğ., 2014). UYA/TA oranının bu aralığa kadar düşmemesinin nedeni ortamın bazikleşmemesi ve UYA yıkımının gerçekleşmemesidir.

Üçüncü deneyde spesifik metan üretimi 68 NL CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.2. İkinci deney

İkinci deneyde fermantere %50 sebze atığı, %35 yemek ve % 15 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir. Bu deneyde fermanterdeki TK oranı, içerdiği yemek atığı nedeniyle %17'dir.



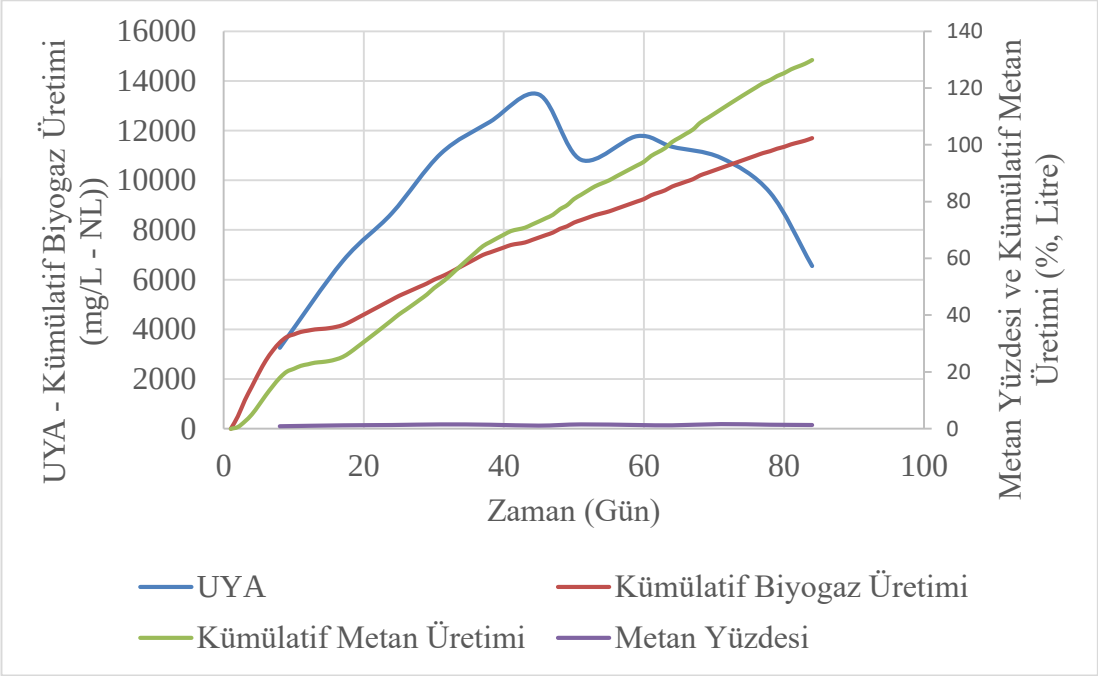
Şekil 3.4. İkinci deney UYA, alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.4'te ikinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Deney başlatıldıktan sonra uçucu yağ asitleri (UYA) miktarı 31. güne kadar artarak 11075 mg/L seviyesine gelmiştir. Deneyin 45. gününde uçucu yağ asitleri pik değeri olan 13450 mg/L değerine eriştikten sonra 84. güne kadar 10000 seviyelerinde seyrettikten sonra 84. günde 6550 mg/L seviyesine düşmüştür.

Alkalinite değeri 45. güne kadar ortalama 500-600 mg/L değerlerindel kalmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri artarak 6615 mg/L seviyesine yükselmiştir.

Deney başlatıldığında pH değeri 4,11 olup 71. günde 5,51 değerine yükselmiştir. Alkalinitenin artışı pH'taki artışı sağlamıştır. Deneyin 45. gününden sonra alkalinitenin artışı pH değerindeki yükselmeyi sağlamıştır.



Şekil 3.5. İkinci deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği

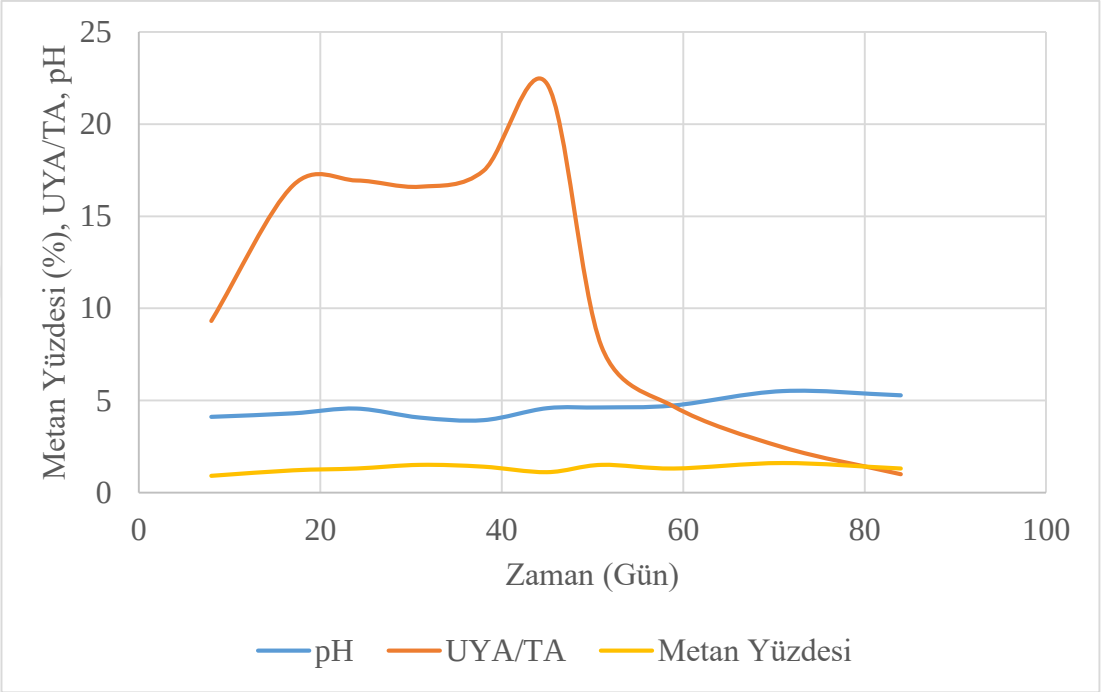
Şekil 3.5'de ikinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

Metan yüzdesi deney süresince % 1 seviyelerinde seyretmiştir. Deneyde kümülatif metan üretimi 130 L olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 3.6'da ikinci deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH, metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Deney başlangıcında UYA/TA oranı 9,31 değerinde olup 17. günde 16,67 değerine ulaşmış ve 38. güne kadar bu seviyelerde seyretmiştir. Daha sonra UYA/TA oranı

artmaya başlayıp 45. günde 22,19 değerine ulaşmıştır. Bu artışın nedeni Şekil 3.4'te görülebileceği gibi UYA miktarının zamanla artarken alkalinite değerinin sabit kalmasıdır. Alkalinite değeri artmaya ve UYA miktarı azalmaya başladığı 51. günde UYA/TA oranı 7,94 seviyesine düşmüştür. Deney sonuna kadar düşüş devam etmiş ve deney sonunda UYA/TA oranı 0,99 olmuştur.



Şekil 3.6. İkinci deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Deneyde pH değerinin 7 seviyesine çıkmaması, metanojen evresine girilemediğini göstermektedir. Alkalinite değerinin deneyin 45. gününe kadar 606 mg/L seviyelerinde seyretmesi ve UYA miktarının artması ortamın asitleşmesine neden olmuştur ve bu sıralarda pH değeri 3-4 bandındadır. Alkalinite değerinin 45. günden sonra artmaya başlaması ve UYA miktarının azalmaya başlaması ile pH seviyesi 71. günde 5,51'e ulaşsa da, metan üretimi için gerekli ortam oluşmamıştır. Bu nedenlerle bu deneyde metan üretimi çok az gerçekleşmiştir.

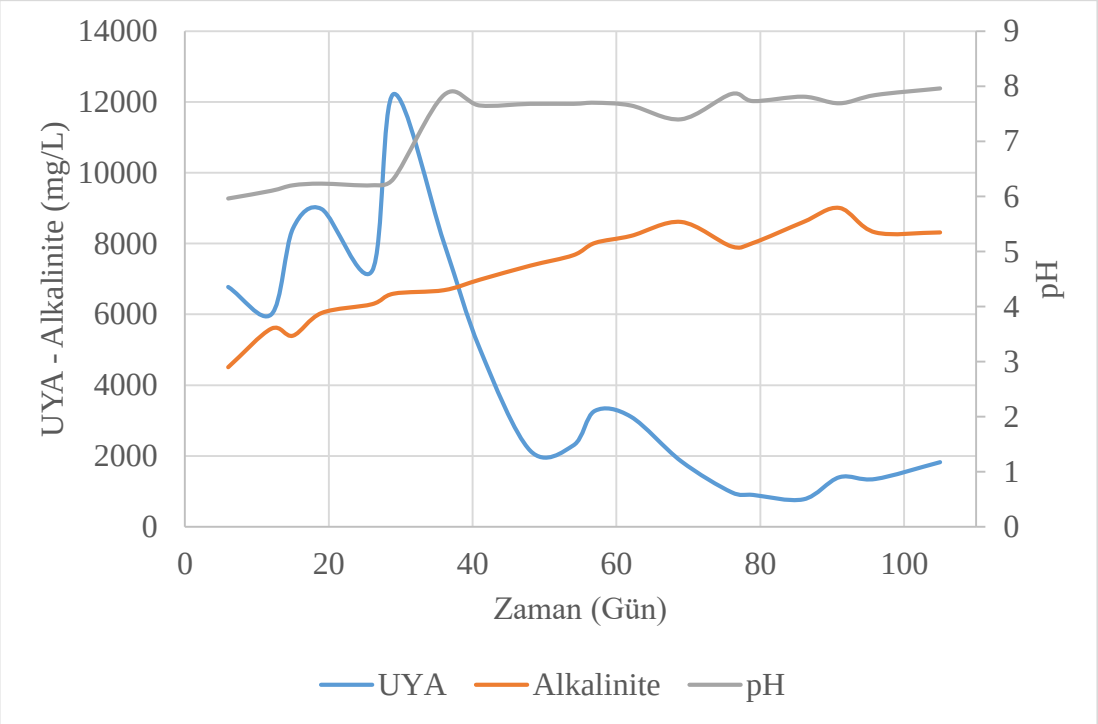
Bu deneyde organik atık kompozisyonu sebze atığı ve yemek atığı olarak seçilmiştir. Yemek atıkları, insanların öğünlerinde yemedikleri ve/veya fazla pişirilen yemeklerden oluşmaktadır. Bu atıklarla sokak hayvanları beslenebilmektedir. T. C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde gerçekleştirilen "Sıfır Atık" projesi, öncelikli olarak israfın önlenmesi ve kaynakların daha etkin kullanılması temellerine dayanmaktadır.

T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2017 yılında ana hizmet binasında uyguladığı sıfır atık çalışmalarında ekmek ve yemek atıkları kaynağında ayrı toplanmıştır. Toplanan 1 ton yemek atığı Ankara Büyükşehir Belediyesi ile yapılan protokol ile hayvan bakım ve rehabilitasyon merkezine gönderilmiştir ve hayvanların beslenmesi sağlanmıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Benzer bir uygulama İZAYDAŞ Solaklar Tesisi bünyesinde de gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Yemekhanede kaynağında ayrı toplanan yemek atıkları tesis içerisindeki belli noktalara boşaltılarak tesisteki hayvanların beslenmesi sağlanmaktadır. Yukarıdaki bilgiler ışığında bu tez çalışması kapsamında pişmiş yemek atıkları ile daha fazla deney yapılmamasına karar verilmiştir.

3.1.3. Üçüncü deney

Üçüncü deneyde fermantere %75 sebze atığı ve % 25 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, atık/gübre oranının kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.



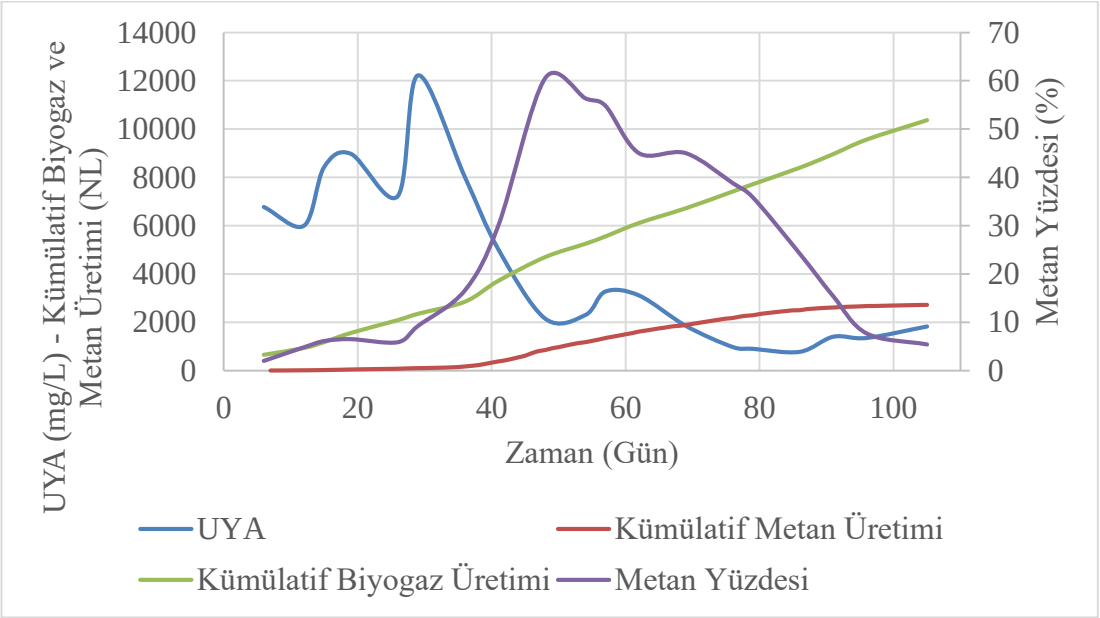
Şekil 3.7. Üçüncü deney UYA, alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.7'de üçüncü deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 29. günde 12225 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 86. günde 775 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Deneyin sonlarına doğru UYA değeri 775-1825 mg/L seviyeleri arasında seyretmiştir. UYA seviyelerinde ilk 40 günde görülen dalgalanma Li C. ve diğ., (2014), Arslan, (2017) ve Li H. L. ve diğ., (2014) çalışmasında da gözlenmiştir.

Alkalinite değeri artarak 36. günde 6683 mg/L değerine ulaşmıştır. Devam eden süreçte alkalinite değeri artmaya devam ederek 57. günde 8019 mg/L seviyesine çıkmış ve deney sonlanana kadar alkalinite değeri 8000-9000 mg/L bandından kalmıştır. Riggo ve diğ., (2017) ahıl yataklarıyla ve Forster-Carneiro ve diğ., (2007a) farklı kentsel katı atıkların organik fraksiyonları ile yaptıkları deneylerde, benzer alkalinite profilleri elde etmişlerdir.

Deney başlatıldığında pH değeri 5,96 olup 36. günde 7,84 değerine yükselmiştir. Deney sonlanana kadar pH değeri 7-8 bandında kalmıştır. Alkalinitenin artışı pH'taki artışı sağlamıştır.

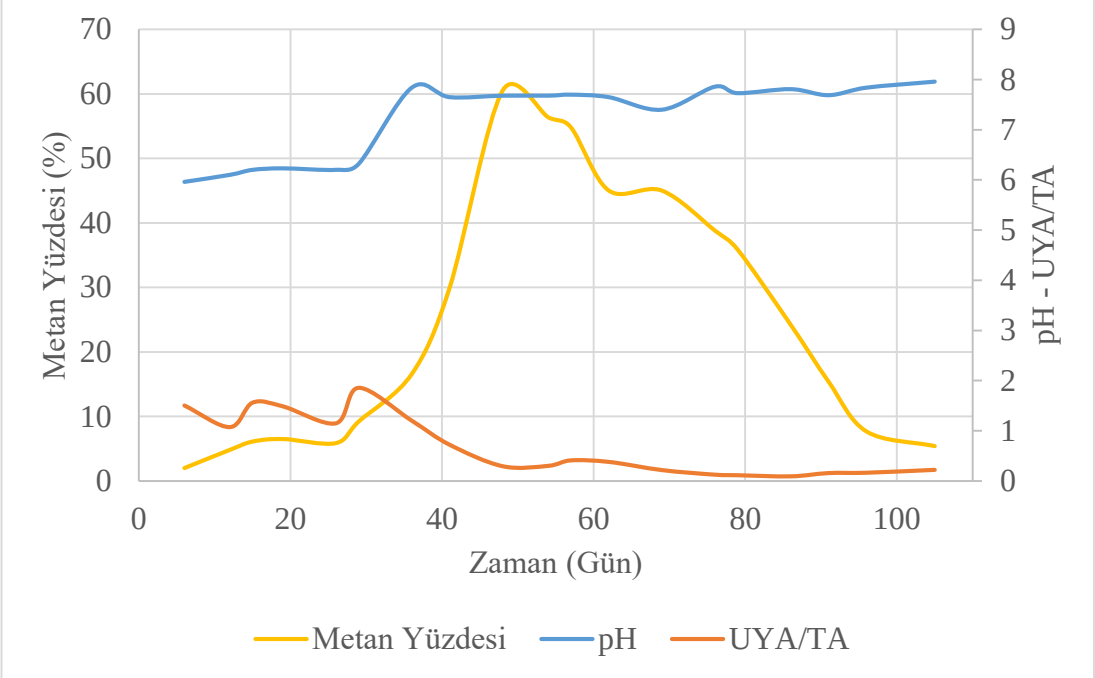


Şekil 3.8. Üçüncü deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği

Şekil 3.8'de üçüncü deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

Metan yüzdesi 26. güne kadar % 6 seviyelerinde iken, 26. günden sonra artmaya başlayarak 48. Günde maksimum değeri olan %60,52 seviyesine kadar yükselmiştir. Daha sonra 105. güne kadar düşmeye devam etmiş ve % 5,4 seviyelerine kadar inmiştir. Uçucu yağ asitlerinin 29. günden sonra azalmaya başlaması ile metan yüzdesi artmaya başlamıştır.

Deneyin 36. gününe kadar 200 L metan üretimi gerçekleşmiş ve pH'ın 7'nin üzerine çıkmasından sonra metan üretimi artarak devam edip toplamda 2750 L metan üretilmiştir.



Şekil 3.9. Üçüncü deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.9'da üçüncü deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH ve metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Deney başlangıcında UYA/TA oranı 1,5 değerinde olup 48. güne kadar azalarak 0,29 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonlanana kadar bu oran 0,1-0,4 bandında kalmıştır. Deneyin 48. gününe kadar azalan UYA/TA oranı ile artan metan yüzdesi

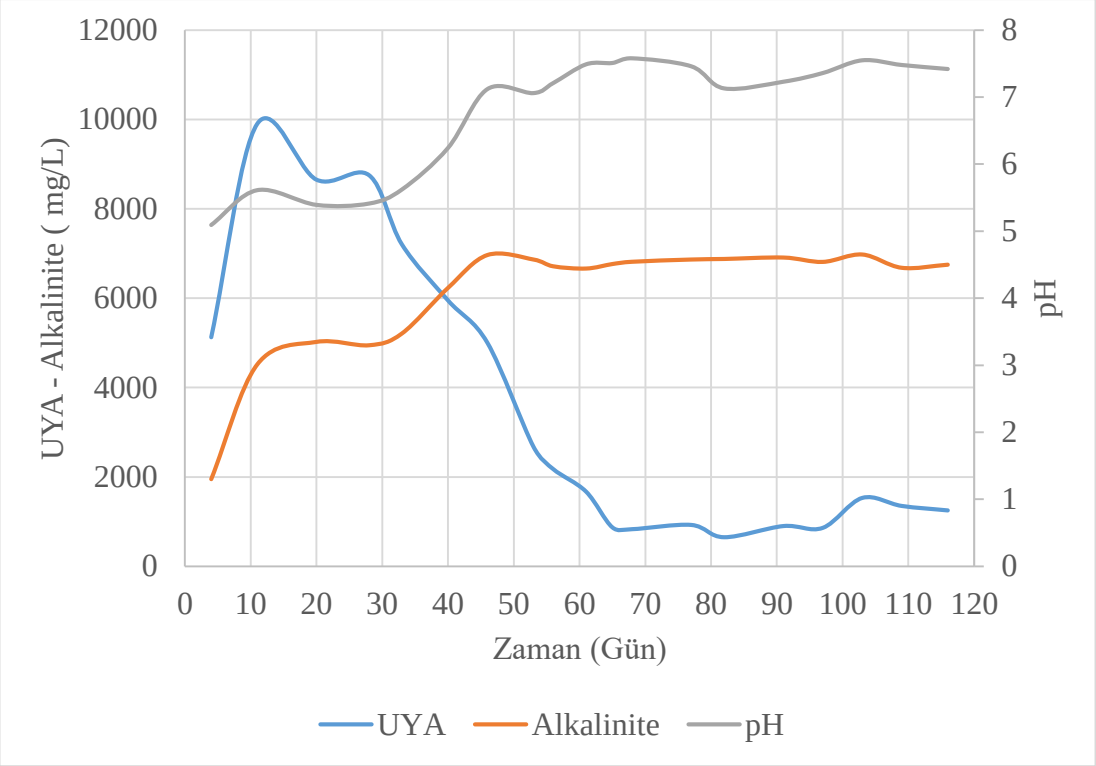
gözlenmektedir. Benzer UYA/TA grafiği Pezzolla ve diğ., (2017)'nin çalışmasında da gözlenebilmektedir.

Deneyin 36. gününe kadar pH değeri 6,3 değerlerindedir ve bu sırada UYA/TA oranı 1,5'dan 1,2'ye düşmüştür ve bu süreçteki ortalama metan yüzdesi % 6'dır. UYA/TA değerinin azalmaya devam etmesi ve stabil hale gelen alkalinitenin etkisi ile artan pH'ın 7 değerini geçmesi ile birlikte metan yüzdesindeki artış gerçekleşmiş ve 48. günde maksimum değeri olan % 60'e ulaşmıştır.

Üçüncü deneyde spesifik metan üretimi 369 L CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.4. Dördüncü deney

Dördüncü deneyde fermantere % 65 sebze atığı ve % 35 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, atık/gübre oranının kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.



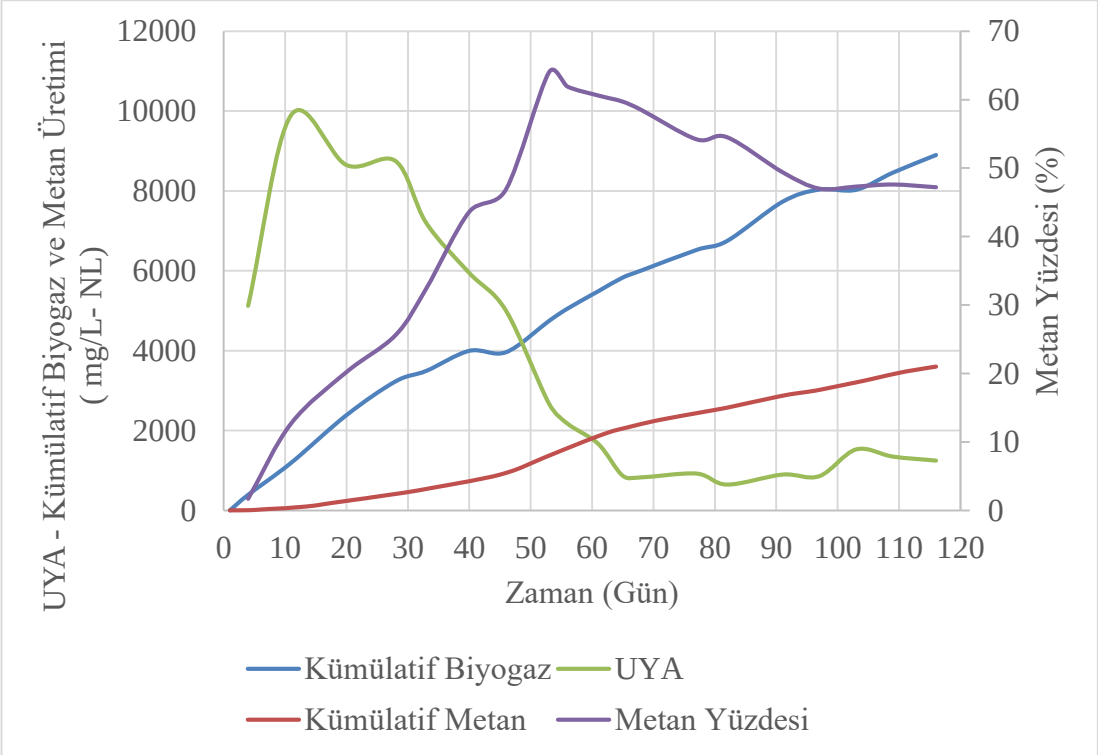
Şekil 3.10. Dördüncü deney UYA, alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.10'de dördüncü deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 11. günde 9900 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 65. günde 870 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Deneyin sonlarına doğru UYA değeri 650-1530 mg/L seviyeleri arasında seyretmiştir.

Alkalinite değeri artarak 46. günde 6969 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 6800 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

Deney başlatıldığında pH değeri 5,09 olup 46. günde 7,12 değerine yükselmiştir. Alkalinitenin artışı pH'taki artışı sağlamıştır.

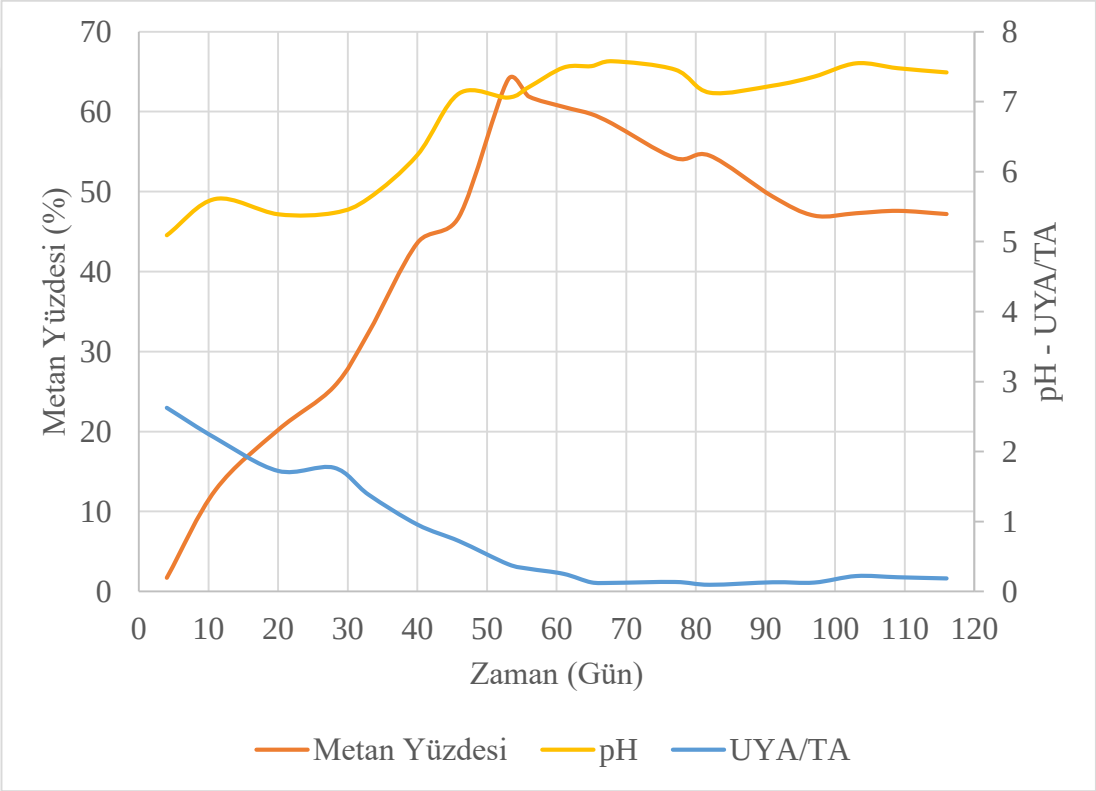


Şekil 3.11. Dördüncü deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği

Şekil 3.11'de dördüncü deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

Metan yüzdesi deney başlangıcından 53. güne kadar nerdeyse lineer bir artış göstermiştir ve metan yüzdesi % 64 seviyesine kadar artmıştır. Daha sonra 103. güne kadar düşmeye devam etmiş ve % 47,2 seviyelerine kadar inmiştir. Uçucu yağ asitlerinin 28. günden sonra azalmaya başlaması ile metan yüzdesi artmaya başlamıştır.

Deneyin 46. gününe kadar 940 L metan üretimi gerçekleşmiş ve pH'ın 7'nin üzerine çıkmasından sonra metan üretimi artarak devam edip toplamda 3600 L metan üretilmiştir.



Şekil 3.12. Dördüncü deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.12'te dördüncü deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH, metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

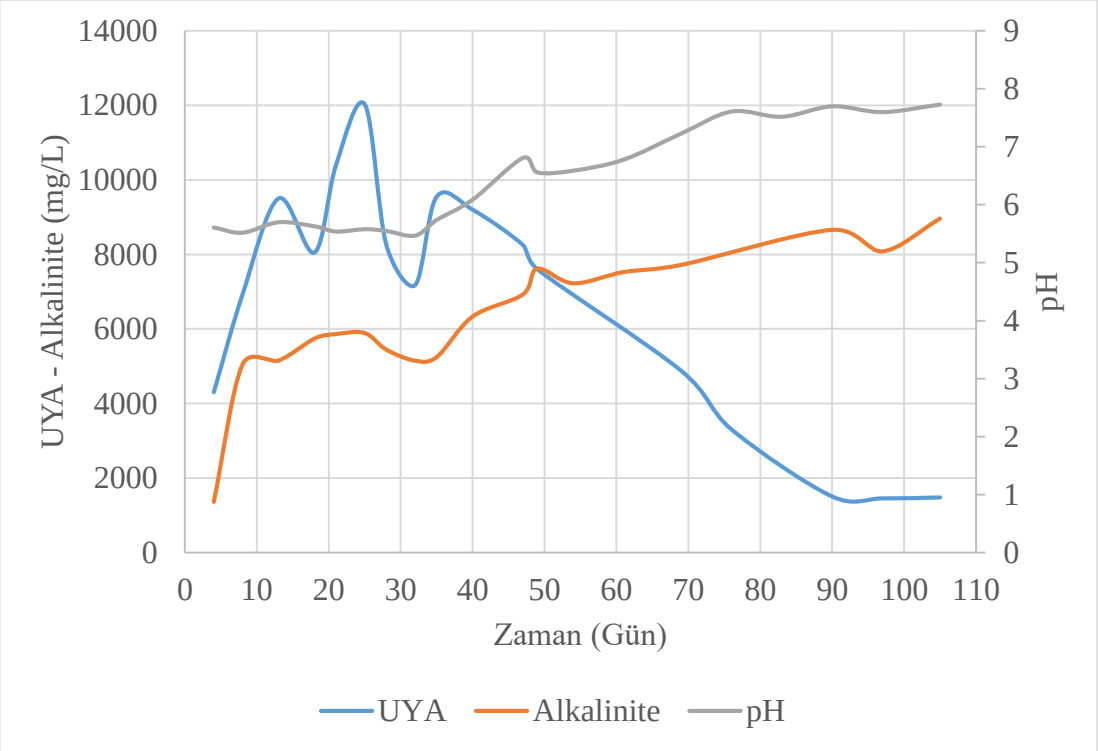
Deney başlangıcında UYA/TA oranı 2,62 değerinde olup 53. güne kadar azalarak 0,39 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonlanana kadar bu oran 0,1-0,3 bandında kalmıştır. Deneyin 53. gününe kadar azalan UYA/TA oranı ile artan metan yüzdesi gözlenmektedir.

Deneyin 28. gününe kadar pH değeri 5,41 değerlerindedir ve bu sırada UYA/TA oranı 2,62'den 1,77'ye düşmüştür ve bu süreçteki ortalama metan yüzdesi %20'dir. UYA/TA değerinin azalmaya devam etmesi ve 46. günden sonra 6800 mg/L değerlerinde stabil hale gelen alkalinitenin etkisi ile artan pH'ın 7 değerini geçmesi ile birlikte metan yüzdesindeki artış gerçekleşmiş ve 53. günde maksimum değeri olan %64'e ulaşmıştır.

Dördüncü deneyde toplam uçucu katı yıkımı %73,43 olmuş ve spesifik metan üretimi 430 L CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.5. Beşinci deney

Beşinci deneyde fermantere % 65 sebze atığı ve % 35 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 6 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.



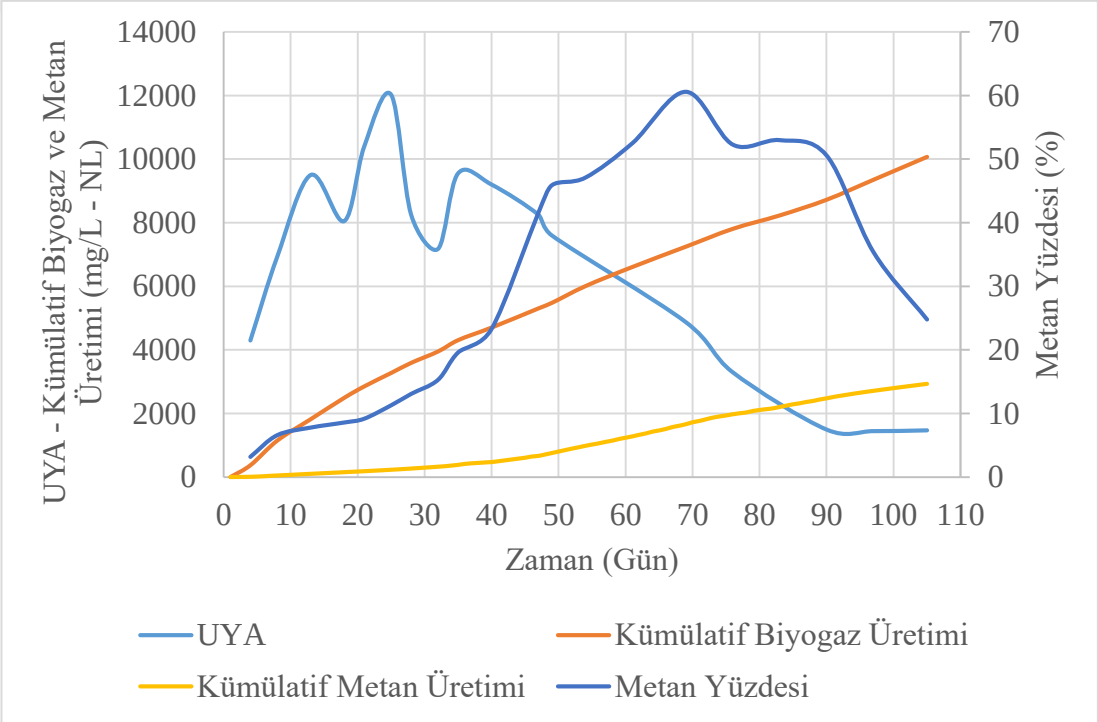
Şekil 3.13. Beşinci deney UYA-Alkalinite-pH grafiği

Şekil 3.13'te beşinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir. Deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 13. güne kadar lineer olarak

artmış, 13. ve 40. günler arasında 12025 mg/L ile 7125 mg/L değerleri arasında dalgalanmış ve 90. günde 1500 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır.

Alkalinite değeri 61. güne kadar dalgalanarak artarak 8910 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 8000 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

Deney başlatıldığında pH değeri 5,52 olup 69. günde 7,23 değerine yükselmiştir. Alkalinitenin dalgalanarak yükselip 8000 mg/L seviyelerinde stabilleşmesinden sonra pH değeri 7'nin üzerine çıkmıştır.



Şekil 3.14. Beşinci deney UYA, Metan Yüzdesi ve Kümülatif Biyogaz ve Metan Üretimi grafiği

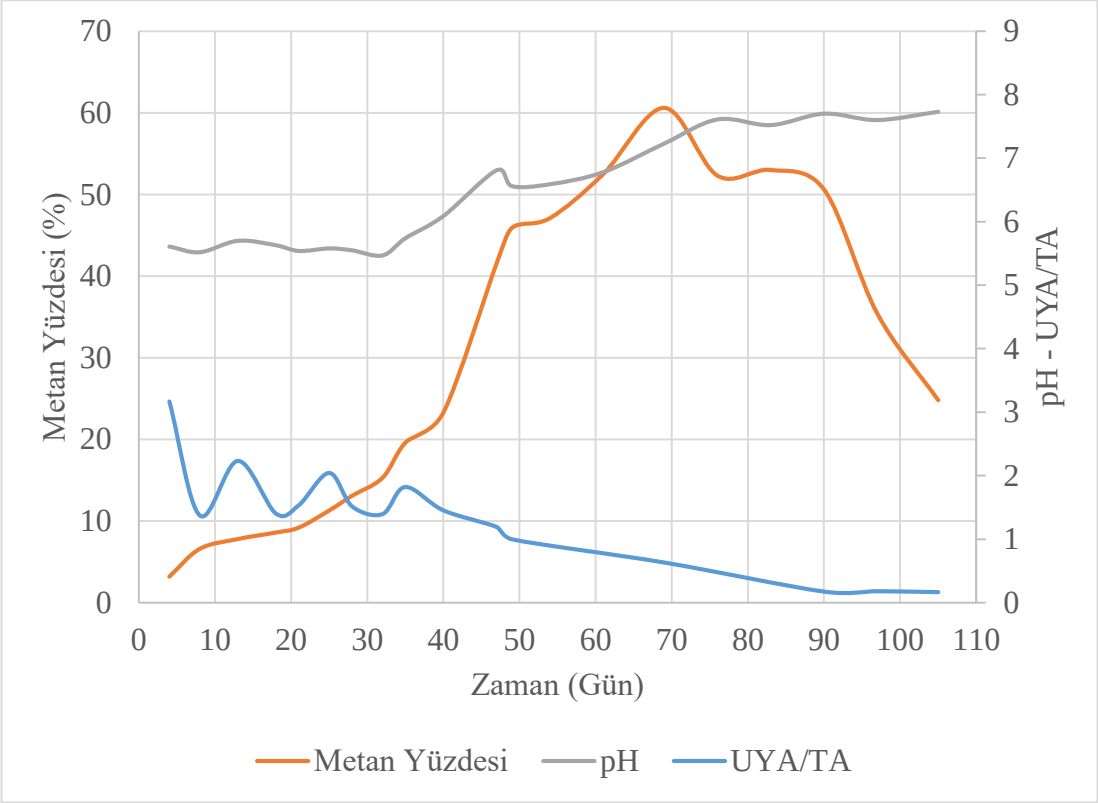
Şekil 3.14'de beşinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

Metan yüzdesi deneyin 35. gününde % 19,6 seviyesinde iken, bu günden sonra metan üretimi hızlanarak 47. günde % 41,3 seviyesine çıkmıştır. Deneyin 69. gününde metan üretimi maksimum değeri olan % 60,6 değerine ulaşmıştır. Daha sonra 76. günde %

52,3 değerine düşmüş ve 90. güne kadar % 52 seviyelerinde seyretmiştir. Deneyin 90. gününden sonra metan yüzdesi düşmeye başlamış ve deney sonunda % 24,8 değerine kadar düşmüştür.

Deneyin 35. gününden 90. gününe kadar uçucu yağ asitleri 9550 mg/L değerinden 1500 mg/L değerine azalırken, metan yüzdesi 35. günde % 19,6'dan 69. günde % 60,6 seviyesine kadar yükselip 90. günde % 50,6 seviyesine inmiştir. Uçucu yağ asitlerinin 1500 mg/L seviyelerinde stabil kaldığı 90. ile 105. günler arasında metan yüzdesi % 50,6'dan % 24,8 seviyesine düşmüştür.

Deneyin 35. gününde kümülatif metan üretimi 375 L iken artan metan oranı ile metan üretimi de artmış ve deney sonunda toplam 2926 L Metan üretilmiştir.



Şekil 3.15. Beşinci deney Metan Yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.15'te beşinci deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH, metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Deney başlangıcında UYA/TA oranı 3,16 değerinde olup 35. güne kadar dalgalanarak azalarak 1,82 seviyesine inmiş ve bu günden sonra neredeyse lineer bir azalımla 90.

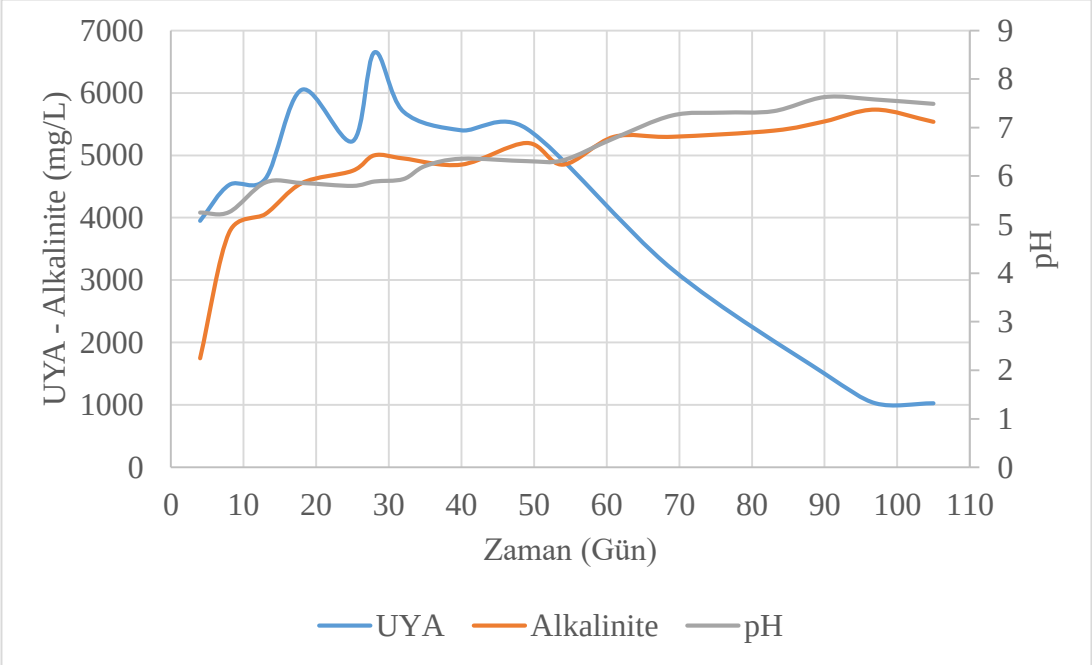
günde 0,17 seviyesine kadar inmiştir. Şekil 3.16'da açıkça görülmektedir ki 35. günden sonra UYA/TA oranının azalmasıyla metan yüzdesinde artış gerçekleşmektedir.

Aynı şekilde 35. günde pH değeri 5,74 iken UYA/TA oranının azalmasıyla pH değeri artmaya başlamış ve 69. Günde 7,23 değerine ulaşmıştır. Metan yüzdesi, 35. günde pH değeri 5,74 iken %19,6 değerindedir ve Şekil 3.14'te görülebileceği gibi uçucu yağ asitlerinin 35. günden itibaren azalmaya başlaması ile birlikte metan yüzdesi ve pH da artmaya başlamıştır.

Beşinci deneyde toplam uçucu katı yıkımı %74,43 olmuş ve spesifik metan üretimi 332 L CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.6. Altıncı deney

Altıncı deneyde fermantere %65 sebze atığı ve % 35 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Sebze atığı yerel bir pazardan, inek gübresi de yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 1 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.



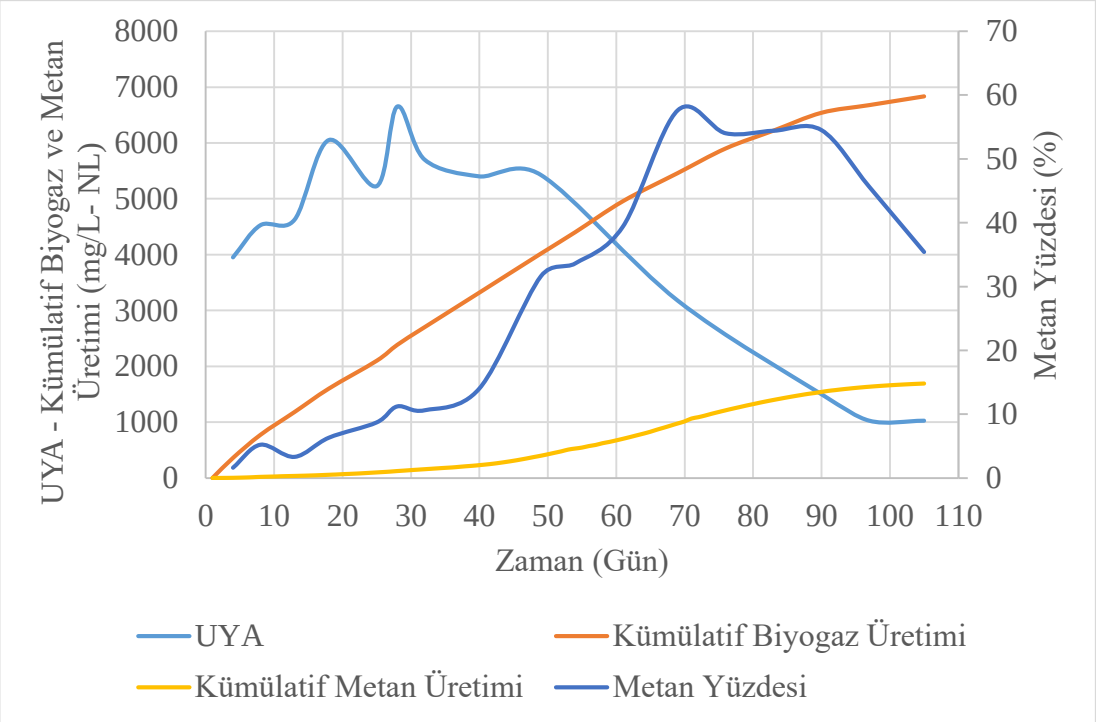
Şekil 3.16. Altıncı deney UYA, alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.16'da altıncı deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Deney başlatıldıktan sonra 28. güne kadar UYA miktarı 3950 mg/L ile 6650 mg/L değerleri arasında dalgalanmış, 32. ile 49. günler arasında 5500 mg/L değerleri arasında nerdeyse stabil kalmış ve 49. günden itibaren azalmaya başlayarak 97. günde 1025 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır.

Alkalinite değeri 1746 mg/L değeri ile başlamış ve 28. günde 5000 mg/L değerine ulaşmıştır. Deneyin 54. gününe kadar 5000 mg/L seviyelerinde seyreden alkalinite değeri 61. günde 5297 mg/L değerine ulaşmış ve deney sonuna kadar 5500 mg/L seviyelerinde seyretmiştir.

Deney başlatıldığında pH değeri 5,25 olup 13. ve 32. günler arasında 5,8 değerlerinde, 35. ve 54. Günler arasında 6.3 seviyelerinde seyrettikten sonra 69. Günde 7,25 değerine ulaşmıştır ve deney sonlanana kadar pH değeri 7-8 bandında kalmıştır. Alkalinitenin dalgalanarak yükselip 5500 mg/L seviyelerinde stabilleşmesinden sonra pH değeri 7'nin üzerine çıkmıştır.



Şekil 3.17. Altıncı deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği

Şekil 3.17'de altıncı deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

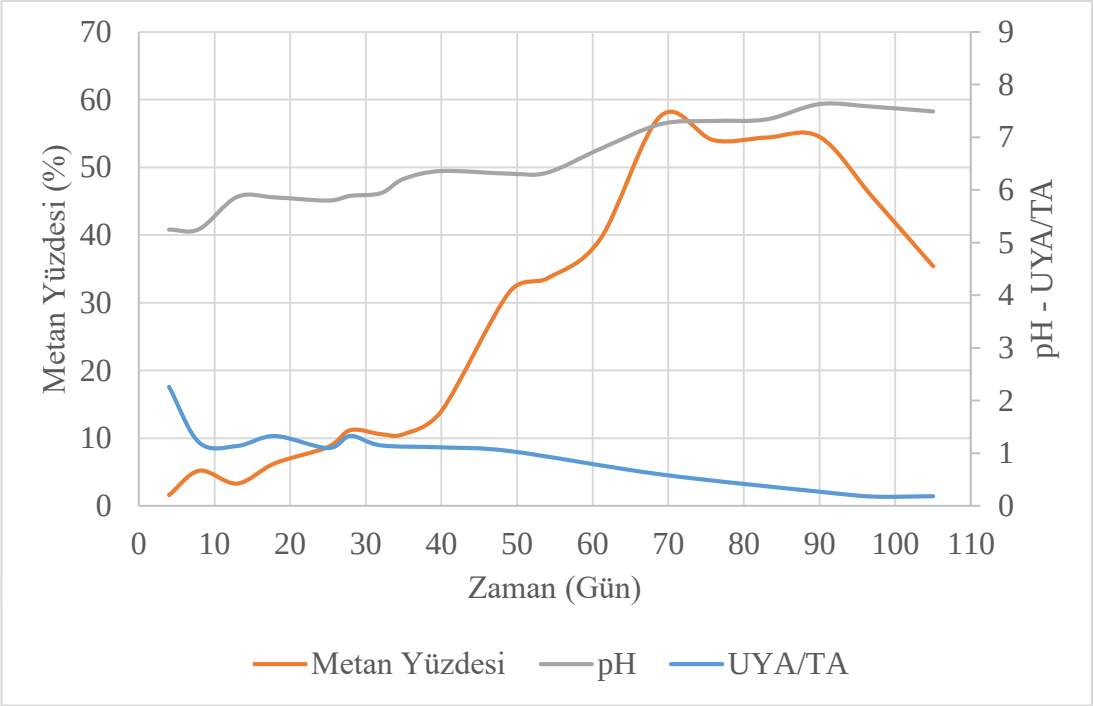
Metan yüzdesi deneyin 28. gününde % 12,2 seviyesinde iken, bu günden sonra metan üretimi hızlanarak 49. günde % 31,6 seviyesine çıkmıştır. Deneyin 69. gününde metan üretimi maksimum değeri olan % 57,6 değerine ulaşmıştır. Daha sonra 76. günde % 54 değerine düşmüş ve 90. güne kadar % 52 seviyelerinde seyretmiştir. Deneyin 90. gününden sonra metan yüzdesi düşmeye başlamış ve deney sonunda % 35,4 değerine kadar düşmüştür.

Deneyin 28. gününden 97. gününe kadar uçucu yağ asitleri 6650 mg/L değerinden 1025 mg/L değerine azalırken, metan yüzdesi 28. günde % 12,2'den 69. günde % 57,6 seviyesine kadar yükselip 97. günde % 45,6 seviyesine inmiştir. Uçucu yağ asitlerinin 1000 mg/L seviyelerinde stabil kaldığı 97. ile 105. günler arasında metan yüzdesi % 45,6'dan % 35,4 seviyesine düşmüştür.

Deneyin 35. gününde kümülatif metan üretimi 181 L iken artan metan oranı ile metan üretimi de artmış ve deney sonunda toplam 1690 L Metan üretilmiştir.

Şekil 3.18'de altıncı deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH ve metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Deney başlangıcında UYA/TA oranı 2,26 değerinde olup 32. güne kadar dalgalanarak azalarak 1,15 seviyesine inmiş ve bu günden sonra neredeyse lineer bir azalımla 97. günde 0,17 seviyesine kadar inmiştir. Şekil 3.19'da açıkça görülmektedir ki 32. günden sonra UYA/TA oranının azalmasıyla metan yüzdesinde artış gerçekleşmektedir.



Şekil 3.18. Altıncı deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Aynı şekilde 28. günde pH değeri 5,89 iken UYA/TA oranının azalmasıyla pH değeri artmaya başlamış ve 69. Günde 7,25 değerine ulaşmıştır. Metan yüzdesi, 28. günde pH değeri 5,89 iken %11,2 değerindedir ve Şekil 3.17'de görülebileceği gibi uçucu yağ asitlerinin 28. günden itibaren azalmaya başlaması ile birlikte metan yüzdesi ve pH da artmaya başlamıştır.

Altıncı deneyde toplam uçucu katı yıkımı % 61,33 olmuş ve spesifik metan üretimi 169 L CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak elde edilmiştir.

3.1.7. Yedinci deney

Yedinci deneyde fermantere % 96,5 sebze atığı ve % 3,5 endüstriyel bir tavuk çiftliğinden temin edilen tavuk gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Şekil 3.19'de görülen tavuk gübresinin fermanterdeki oranının % 3,5 olmasının nedeni partiküllü yapısı ve fermanter içindeki toplam katı (TK) miktarının %10'da tutulmak istenmesidir. Sebze atığı yerel bir pazardan, tavuk gübresi de yerel bir endüstriyel tavuk çiftliğinden alınmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.

Deney başlatıldıktan sonra 33. güne kadar toplam 2427 L biyogaz ve 63 L metan üretilmiştir. Uçucu yağ asitleri 2570 mg/L değerinden 5432 mg/L değerine çıkmış, alkalinite 297 mg/L'den 5432 mg/L değerine yükselmiştir. Deney sırasında pH değeri 4,78 ile başlamış olup, artan alkalinitenin etkisi ile 5,95 değerine kadar yükselmiştir.



Şekil 3.19. Yedinci deneyde fermantere yüklenen tavuk gübresi

Şekil 3.19'da fermantere yüklenen tavuk gübresi görülmektedir. Partiküllü ve toprağa benzeyen yapısı göze çarpmaktadır. Deney başlatıldıktan 33 gün sonra, perkolat resirkülasyonu hattındaki emniyet valfinin arızalanması sonucu tüm perkolat suyu dış ortama boşalmıştır. Arızalanan emniyet valfi Şekil 3.20'de 'A' olarak gösterilmiştir.

Yükleme menüsünde bulunan tavuk gübresi, fermanterdeki 5mm çaplı delikli ızgaradan süzülmüş ve perkolat tankına dolmuştur. Perkolat tanklarının pompa emiş çıkışları, perkolat kabı tabanından 10 cm yukarıya konumlandırılmıştır. Bunun nedeni perkolat sızıntı suyu ile taşınabilecek 5mm altı katı partiküllerin çökelmelerinin sağlanıp, perkolat pompalama hattına gönderilmelerine engel olmaktır.



Şekil 3.20. Yedinci deney sırasında arızalanan emniyet valfi

Perkolat pompalama hattına sızan partiküller, pnomatik uyartımlı valflerin, fermanter emiş ve basma valflerinin ve fermanter giriş kompansatörlerinin tıkanmasına neden olabileceği için kuru fermanter sistemi dizaynı sırasında bu tarz bir önlem alınmıştır.



Şekil 3.21. Yedinci deney sırasında tıkanan fermanter içi sprinkleri

Ancak alınan bu önleme rağmen Şekil 3.21'de görülebileceği gibi fermanter içindeki katı partiküller perkolat pompalama sistemine sızmış ve fermente içi sprinklerde

tıkanma yaşanmıştır. Fermanter içi sprinklerin tıkanması, perkolat pompalama sistemi çalıştığında kullanılan pozitif deplasmanlı pompa nedeni ile basıncı sürekli arttırmıştır. Sürekli artan basınç, sistemdeki pompa-valf, kompansatör-valf, boru-valf, boru-kompansatör, fermanter basma hattı girişi-valf bağlantıları gibi perkolat pompalama hattı bağlantı noktalarında basınç artmış ve kullanılan kauçuk sızdırmazlık elemanlarında sızıntılar meydana gelmiştir.

Olayın nihayetinde perkolat pompalama hattına, pompalama sistemini koruması için konumlandırılan emniyet valfi, artan basınç karşısında gövdesinden ayrılarak sistemdeki tüm perkolat sızıntı suyunun dışarı tahliye edilmesine neden olmuştur.

Endüstriyel tavuk gübresi kullanılması düşünülen doldur-boşalt usulü çalışacak kuru fermanter sistemlerinde, perkolat sızıntı suyu resirkülasyonu hattına, perkolat sızıntı suyundaki katı partikülleri ayrıştırması için bir filtre takılabilir. Benzer amaçla bir filtre Yap ve diğ. (2016) tarafından kullanılmıştır. Bunun dışında daha az perkolat resirkülasyonu yapılan konfigürasyonlar tercih edilebilir (Arslan K., 2018).

3.1.8. Sekizinci deney

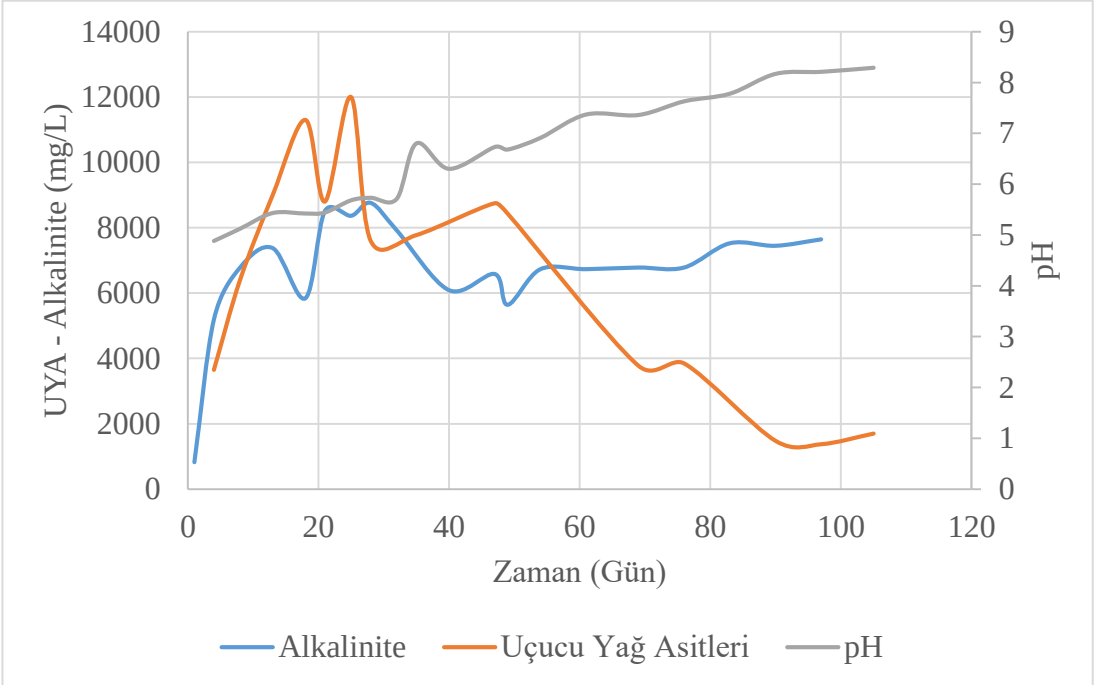
Sekizinci deneyde fermantere % 96,5 sebze atığı ve % 3,5 yerel bir hayvan yetiştiricisinden temin edilen tavuk gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Şekil 3.22'te görülen tavuk gübresinin fermanterdeki oranının % 3,5 olmasının nedeni partiküllü yapısı ve fermanter içindeki toplam katı (TK) miktarının %10'da tutulmak istenmesidir. Sebze atığı yerel bir pazardan, tavuk gübresi de yerel hayvan yetiştiricisinden alınmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu deneyde amaç, hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecini nasıl etkilediğini incelemektir.

Tavuk gübresi, Şekil 3.22'de görülebildiği gibi kümesin altından, etraftaki saman, sap vb. katışkılardan arındırılarak toplanmıştır. Bu deneyde kullanılan tavuk gübresi, yedinci deneydeki endüstriyel tavuk gübresinde gözlendiği gibi topraklı bir yapıya sahip değildir. Bu nedenle deney sonunda yapılan incelemeler neticesinde hatlarda bir tıkanma gözlenmemiştir.



Şekil 3.22. Sekizinci deneyde fermentlere yüklenen tavuk gübresi

Şekil 3.23'te sekizinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.



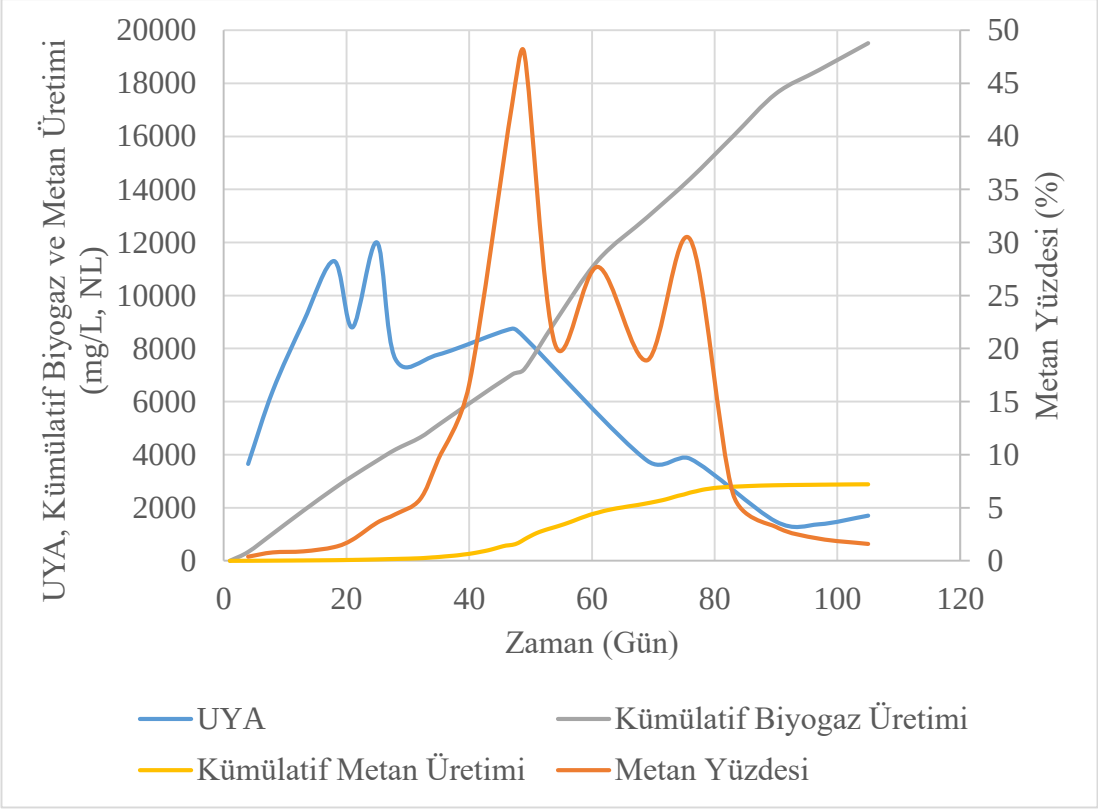
Şekil 3.23. Sekizinci deney UYA, Alkalinite, pH grafiği

Deney başlatıldıktan sonra 47. güne kadar UYA miktarı 3650 mg/L ile 12000 mg/L değerleri arasında dalgalanmış, 47. günden itibaren azalmaya başlayarak 90. günde 1475 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır.

Alkalinite değeri 825 mg/L değeri ile başlamış ve 25. günde 8514 mg/L değerine ulaşmıştır. Deneyin 61. gününe kadar dalgalanarak azalıp 6732 mg/L seviyelerinde inmiştir. Deneyin 76. Gününe kadar 6700 mg/L seviyelerinde seyreden alkalinite değeri deney sonuna doğru artmış ve deneyin 90. gününde 7524 mg/L değerine ulaşmış ve deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır.

Deney başlatıldığında pH değeri 4,88 olup 32. günde 5,71 değerlerine, 35. ve 54. Günler arasında 6.8 seviyelerinde seyrettikten sonra 61. Günde 7,37 değerine ulaşmıştır. Deneyin sonlarına doğru artan alkalinite ile beraber pH değer, de artmaya devam etmiş ve 90. günde pH 8,17 değerine yükselmiştir. Deney sonlanana kadar pH değeri 8,2 bandında kalmıştır.

Alkalinitenin dalgalanarak yükselip 61. ve 83. günler arasında 6700 mg/L seviyelerinde stabilleşmesi sırasında pH değeri 7'nin üzerine çıkmıştır. Bu durum beşinci ve altıncı deneylerde de gözlenmiştir. Ancak 90. günden sonra alkalinite değerinin 7524 mg/L seviyesine yükselmesi ile pH değeri de artış göstermiş ve 8,2 seviyesine yükselmiştir.



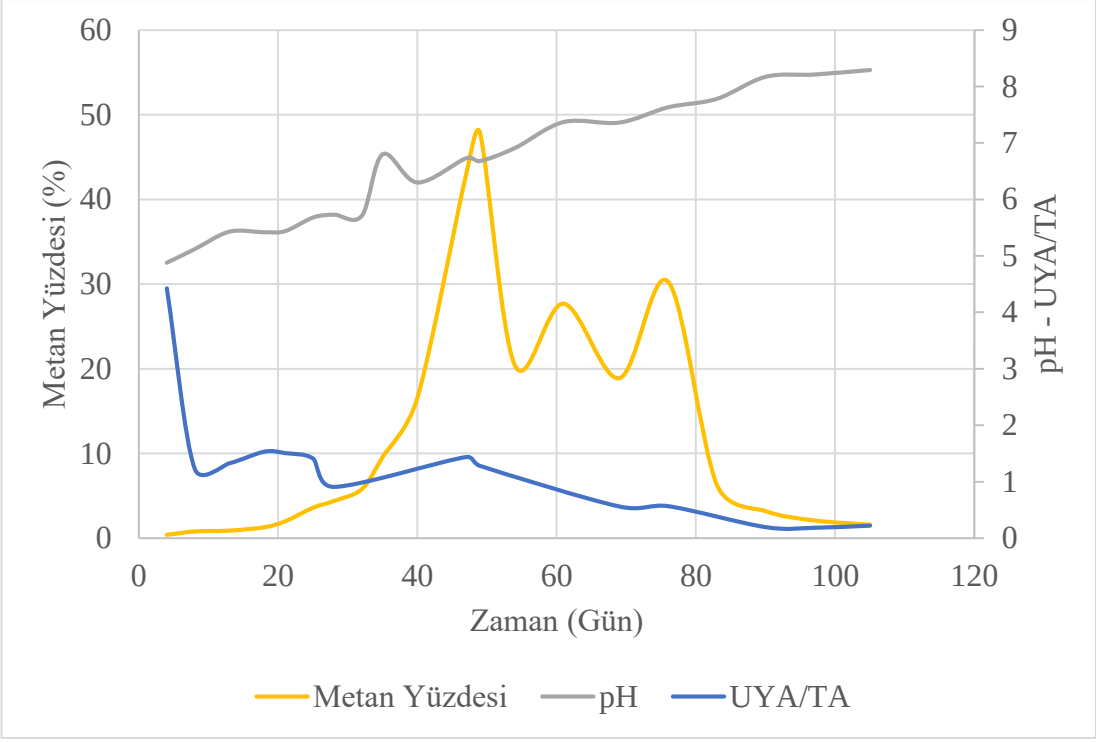
Şekil 3.24. Sekizinci deney UYA, Metan Yüzdesi ve Kümülatif Biyogaz ve Metan Üretimi grafiği

Şekil 3.24'te sekizinci deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak artarak gerçekleştiği gözlenmiştir.

Metan yüzdesi deneyin 40. gününde % 16,6 seviyesinde iken, bu günden sonra metan üretimi hızlanarak 49. günde % 47,8 seviyesine çıkmıştır. Deneyin devamında metan yüzdesi 76. güne kadar %18-30 değerleri arasında dalgalanmıştır. Daha sonra azalarak %6 seviyesine düşmüş ve deney sonunda % 1,6 değerine ulaşmıştır.

Deney başlatıldıktan sonra 47. güne kadar UYA miktarı 3650 mg/L ile 12000 mg/L değerleri arasında dalgalanırken metan yüzdesi %47,8 seviyesine çıkmıştır. Daha sonra UYA yıkımı devam ederken metan yüzdesi %18-30 değerleri arasındadır. UYA 90. günde 1475 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır ve bununla birlikte metan yüzdesi de azalarak %1,6 seviyesine kadar düşmüştür.

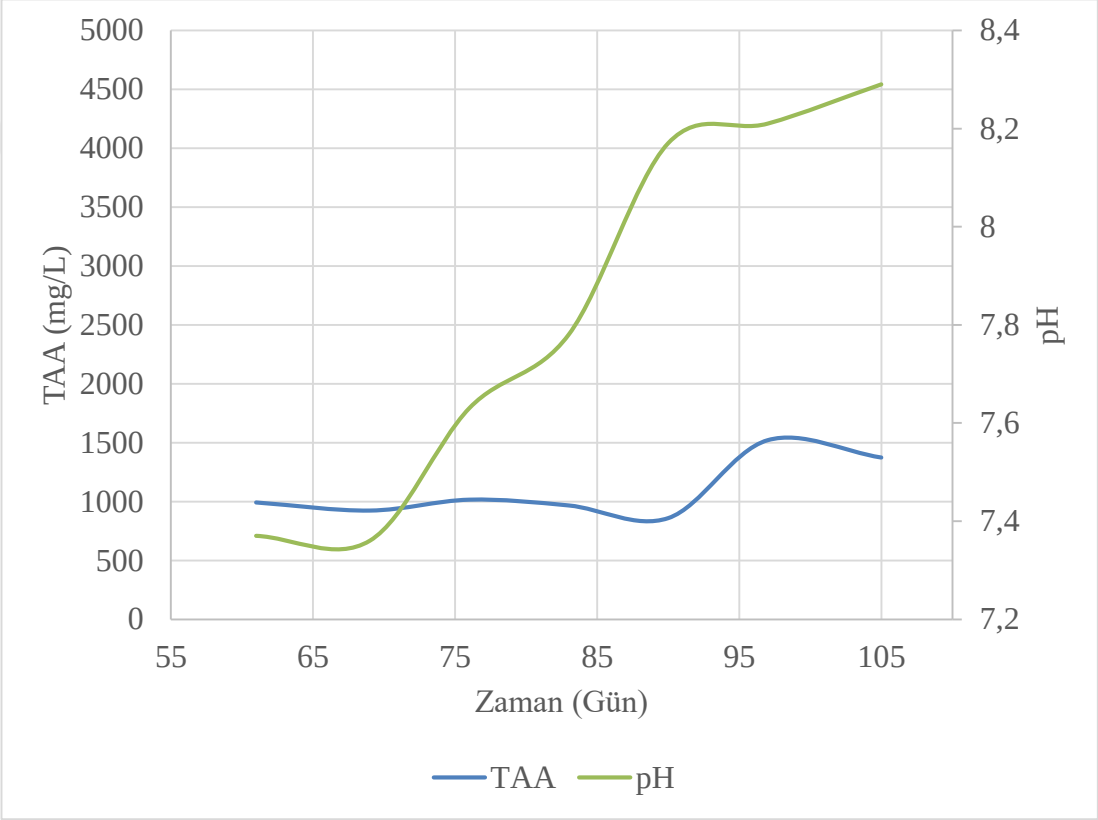
Deneyin 41. gününde kümülatif metan üretimi 300 L iken artan metan oranı ile metan üretimi de artmış ve deney sonunda toplam 2800 L metan üretilmiştir.



Şekil 3.25. Sekizinci deney metan yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.25'de sekizinci deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH ve metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Deney başlangıcında UYA/TA oranı 4,42 değerinde olup 28. güne kadar dalgalanarak azalarak 0,9 seviyesine inmiş ve bu günden sonra azalmaya devam ederek 90. günde 0,19 seviyesine kadar inmiştir. Şekil 3.25'da 28. günden sonra UYA/TA oranının azalmaya başlaması ile metan yüzdesinde artış gözlenebilmektedir. Ancak deneyin sonlarına doğru metan yüzdesinde azalma gözlenmektedir.



Şekil 3.26. Sekizinci deney TAA ve pH grafiği

Şekil 3.26'da verilen grafikte toplam amonyak azotu (TAA) ve pH değerlerinin zamanla değişimi görülmektedir. TAA değeri 1000-1500 mg/L seviyelerinde seyretmektedir ve pH seviyesi deneyin sonlarına doğru 8'e yaklaşmıştır. Mevcut değerlere bakıldığında TAA değerinin toksik sınırlara ulaşılmadığı gözlemlenmektedir (Yenigün ve Demirel, 2013).

3.1.9. Dokuzuncu deney

Dokuzuncu deneyde amaç, metan üretimi çok yavaş olan birinci deneye alkali işlem yaparak metan üretimini arttırmaktır. Birinci deneyde fermantere % 85 sebze atığı ve % 15 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Sebze atığı yerel bir pazardan, inek gübresi de yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır.

Birinci deneyin devam ettirilebilmesi amacı ile pH değerinin 7'ye çıkarılması gerekmektedir. Her ne kadar Gerardi, (2003) NaOH'ın anaerobik fermanterlerde metan oluşturan bakterilerin bikarbonat ihtiyacını karşılamadığı için uygun bir alkalinite kaynağı olmadığını belirtse de, Deublein ve Steinhauser, (2011), Ahring, (2003), Wellinger ve diğ., (2013) gibi araştırmacılar NaOH'ın oksijensiz fermantasyon süreçlerinde alkalinite seviyesini yükseltmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ne kadar NaOH eklenmesi gerektiğinin tespiti için fermanterden bir miktar numune cam behere konulmuş ve manyetik karıştırıcı ile karıştırılmaya başlanmıştır. Karıştırılmakta olan numuneye Tablo 3.2'de verildiği gibi düşük dozdan yüksek doza doğru NaOH eklemeleri yapılarak eklenmesi gereken NaOH miktarı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan denemeler sırasında orijinal numunenin pH'ı 5,63'tür.

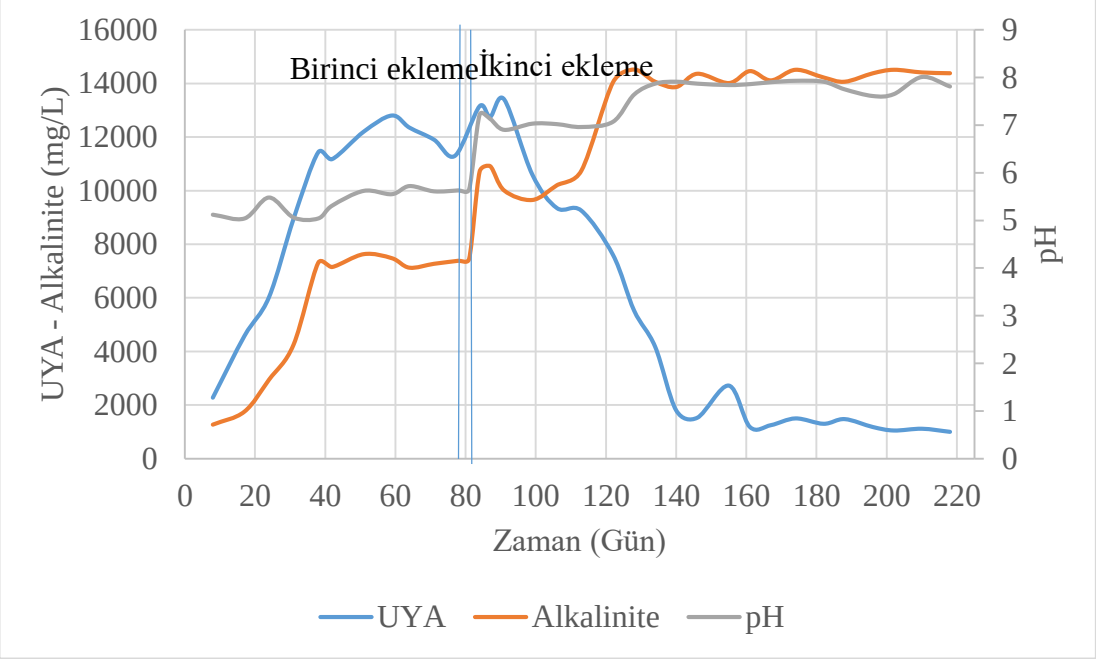
Tablo 3.2. NaOH ekleme miktarları

Molarite (M)	Ekleme Miktarı	pH
0,02	50 µl	5,63
	1 ml	5,63
	5 ml	5,64
	10 ml	5,63
0,1	1 ml	5,65
	5 ml	5,65
	10 ml	5,67
1	1 ml	6,19
	2 ml	6,95
	2,5 ml	7,82

Yapılan NaOH ekleme denemeleri sırasında öncelikle 0,02 M NaOH çözeltisi ile başlanmış ancak 60 ml numuneye 10 ml çözelti eklenmesine rağmen pH değerinde bir değişiklik olmamıştır. Ardından çözeltinin molaritesi 0,02 M'dan 0,1 M'a yükseltilmiş

ve ekleme denemelerine devam edilmiştir. Bir önceki ekleme deneyinde olduğu gibi ekleme miktarı 10 ml olmasına rağmen pH değerinde bir artış gözlenmeyince çözeltinin molaritesi 0,1 M'dan 1 M'a yükseltilmiştir. İlk yapılan 1 ml eklemenin ardından pH değerinin 6,19'a çıkmış ve 2,5 ml eklemeden sonra pH değeri 7,82'ye yükselmiştir. Ardından bu deney 2 kere daha tekrarlanmış ve nihai pH değeri 7,56 ve 7,64 olarak bulunmuştur.

Laboratuvar ortamında ekleme miktarının tespitinin ardından pilot ölçekli tesiste ekleme yapılması için çözelti hazırlanma işlemine başlanmıştır. Gerardi (2003), yapılacak alkali müdahalelerde içerideki bakteri topluluğunun alkalinite ve pH'daki ani değişimden olumsuz yönde etkilenmemesi için alkali kimyasalın yavaş yavaş eklenmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu nedenle düşük molariteli bir çözelti hazırlanıp 79. günde eklendikten sonra yüksek molariteli çözelti hazırlanıp 81. günde eklenmiştir.



Şekil 3.27. Dokuzuncu deney UYA, alkalinite, pH grafiği

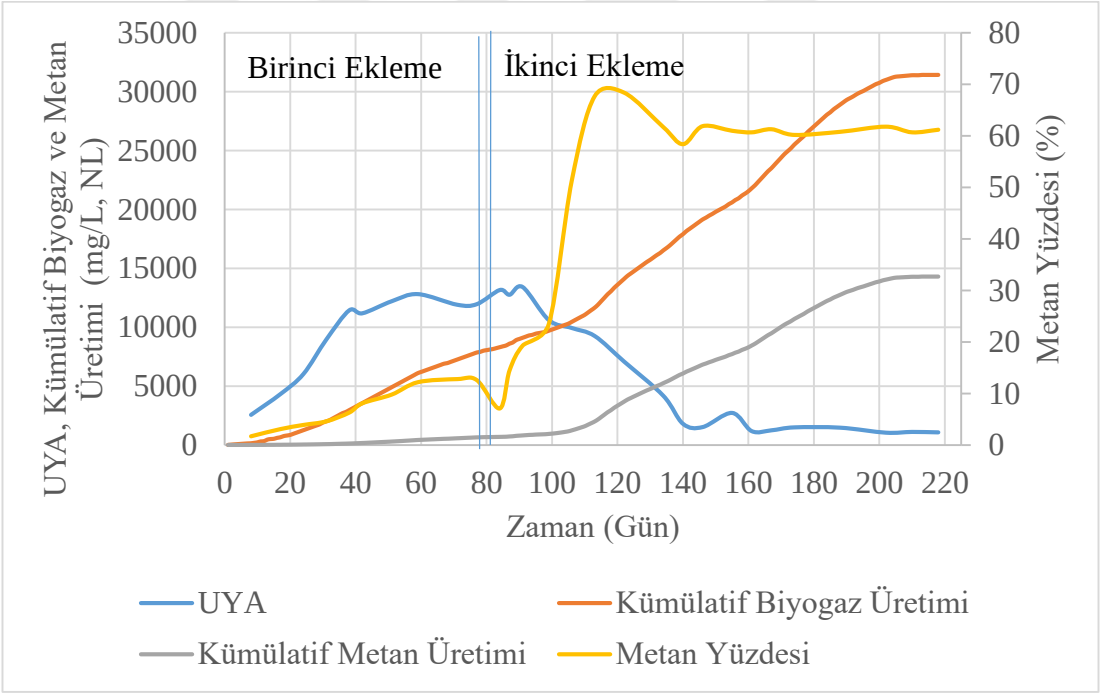
Şekil 3.27'de dokuzuncu deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Ekleme işlemleri yapıldıktan sonra UYA miktarı artmaya devam etmiş ve 91. günde UYA miktarı 13450 mg/L değerine çıkmıştır. Daha sonra 146. güne kadar azalarak

1525 mg/L değerine düşmüştür. Deneyin 155. günüde yaşanan dalgalanmanın ardından deney sonuna kadar UYA miktarı 1200 mg/L seviyesinde kalmıştır.

Alkalinite değeri ekleme işleminden sonra artış göstermeye başlamış ve 84. günde 10706 mg/L değerine ulaşmıştır. Deneyin 113. gününe kadar 9600 – 10741 mg/L değerlerinde dalgalandıktan sonra alkalinite değeri 122. günde 14037 mg/L değerine çıkmıştır. Deney sonuna kadar alkalinite değeri 14200 mg/L seviyelerinde kalmıştır.

Deneyin 77. gününde 5,95 olan pH değeri, ekleme işlemi gerçekleştirildikten sonra 84. günde 7,22 değerine yükselmiştir. Deneyin 122. gününe kadar pH değeri 7 seviyelerindedir. Bu günden sonra pH değeri artmaya başlamış ve 134. günde 7,87 değerine ulaşmıştır. Deney sonlanana kadar pH değeri 7,8 seviyesinde kalmıştır. Deneydeki pH seviyesinin artmasının nedeni, 122. günde artan alkalinitedir. Alkalinite değeri 122. günden sonra stabilleşmiş ve bunu takiben pH değeri de 134. günden sonra stabilleşmiştir.

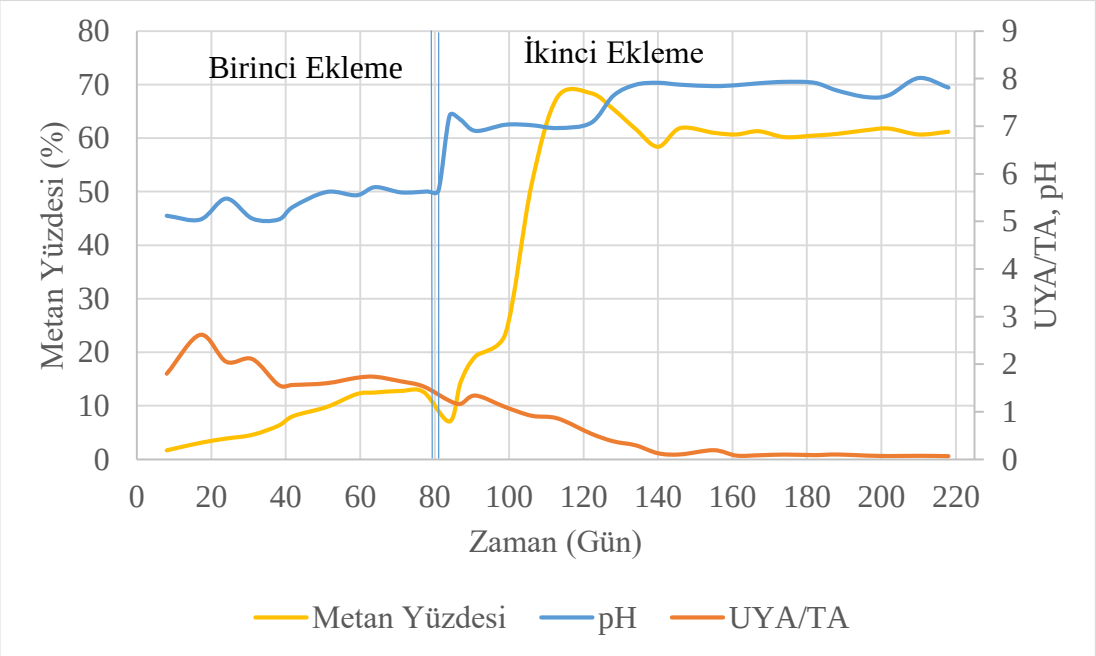


Şekil 3.28. Dokuzuncu deney UYA, metan yüzdesi ve kümülatif biyogaz ve metan üretimi grafiği

Şekil 3.28'de dokuzuncu deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak arttığı ve 200. günde sonra üretimin ciddi miktarda azaldığı görülmektedir.

Metan yüzdesi ekleme yapıldıktan sonra 84. günde % 7 seviyesine düşmüş ancak 87. günde tekrar artarak % 14 seviyesine çıkmıştır. Bu durumun sistemin NaOH eklemesine adaptasyonu sırasında gerçekleştiği düşünülmektedir. Deneyin 99. gününde metan yüzdesi artarak % 23,5 seviyesine çıkmıştır. Daha sonra metan yüzdesi ani bir çıkış ile 122. günde % 68,4 değerine ulaşmıştır. Burada pik yaptıktan sonra metan yüzdesi bir miktar azalarak 146. günde % 61,9 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonuna kadar metan yüzdesi % 61 seviyelerinde bulunmuştur. Deneyin 91. gününden 146. gününe kadar uçucu yağ asitleri 13450 mg/L değerinden 1525 mg/L değerine azalırken, metan yüzdesi 91. günde % 19,3'ten 122. günde % 68,4 seviyesine kadar yükselip 146. günde % 61,9 seviyesine inmiştir. Uçucu yağ asitlerinin 1200 mg/L seviyelerinde stabil kaldığı günlerde metan yüzdesi % 61 seviyelerinde stabil kalmıştır.

Deneyin 99. gününde kümülatif metan üretimi 935 L iken artan metan oranı ile metan üretimi de artmış ve deney sonunda toplam 14308 L Metan üretilmiştir.



Şekil 3.29. Dokuzuncu deney Metan Yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.29'da dokuzuncu deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH ve metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Ekleme yapıldıktan sonra UYA/TA oranı 1,23 değerinde olup 134. günde 0,3 seviyesine, 140. Günde de 0,13 seviyesine kadar inmiştir. UYA/TA oranının azalmasıyla metan yüzdesinde artış gerçekleşmektedir ve 140. günden itibaren UYA/TA oranın 0,1 civarında stabil kaldığı periyodda metan yüzdesi %61 seviyesindedir.

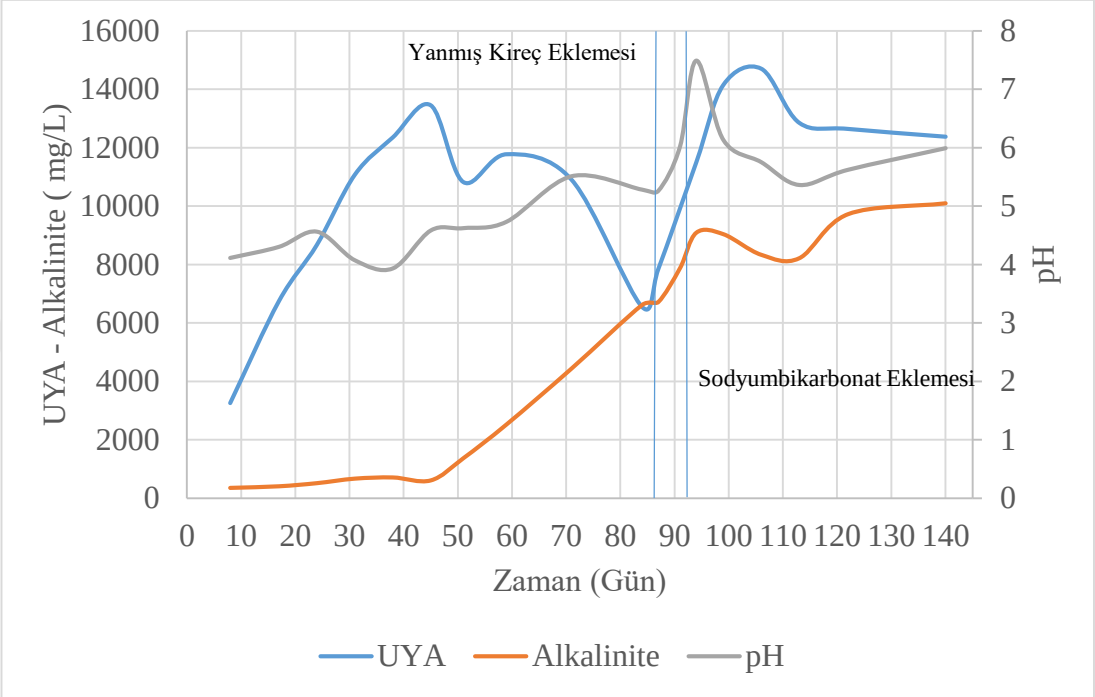
3.1.10. Onuncu deney

Onuncu deneyde amaç, metan üretimi çok yavaş olan ikinci deneye alkali işlem yaparak metan üretimini arttırmaktır. İkinci deneyde fermantere %50 sebze atığı, %35 yemek ve %15 inek gübresinden (yaş ağırlık) oluşan menü yüklenmiştir. Sebze atığı yerel bir pazardan, yemek atığı İZAYDAŞ yemekhanesinden, inek gübresi de yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneyde 12 resirkülasyon yapılmıştır.

İkinci deneyin devam ettirilebilmesi için pH değerinin 7'ye çıkarılması gerekmektedir. Bunun için yapılan literatür taramasında bikarbonat alkalinitesinin metan oluşturan bakteriler açısında çok önemli olduğu ve ekleme yapılacak alkalinite kaynağının (Sodyum Bikarbonat, Potasyum Bikarbonat, Sodyum Karbonat, Potasyum Karbonat, Kalsiyum Karbonat, Kalsiyum Hidroksit, Susuz Amonyak ve Sodyum Nitrat) bikarbonat içermesi gerektiği saptanmıştır. Bu kimyasallardan, sodyum bikarbonat ve potasyum bikarbonat, arzu edilebilir çözünürlükleri, kullanılabilirlikleri ve sindirici içindeki asgari olumsuz etkileri nedeniyle, belki de tercih edilebilecek en iyi kimyasal maddelerdir. Örneğin, bu kimyasalların doz aşımı, sindiricinin pH'ının hızla optimum seviyenin üzerine çıkmasına neden olmaz. Ayrıca, alkalinite ilavesi için kullanılan alkali kimyasallar tarafından salınan tüm katyonlardan, sodyum ve potasyum, sindirici içindeki bakteriler için en az toksik olanıdır.

Kireç ($CaCO_3$) fermanter pH değerini 6,4'e kadar çıkarmak için kullanılabilir. Ardından bikarbonat veya karbonat tuzları (sodyum veya potasyum) pH değerini optimum aralığa çıkarmak için kullanılır. Kireç pH'ı hızlı ve çarpıcı bir şekilde arttırır, ancak kireç alkaliniteyi önemli ölçüde arttırmaz. Kirecin aşırı dozu, pH'ın optimum pH aralığını kolayca aşmasına neden olabilir (Gerardi, 2003).

Dokuzuncu deneyde anlatılan metodoloji takip edilerek ilk önce bir yanmış kireç ($Ca(OH)_2$) solüsyonu hazırlanıp fermantere gönderilmiştir. Bu işlemden dört sonra sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) solüsyonu hazırlanıp fermantere tekrar besleme yapılmıştır.



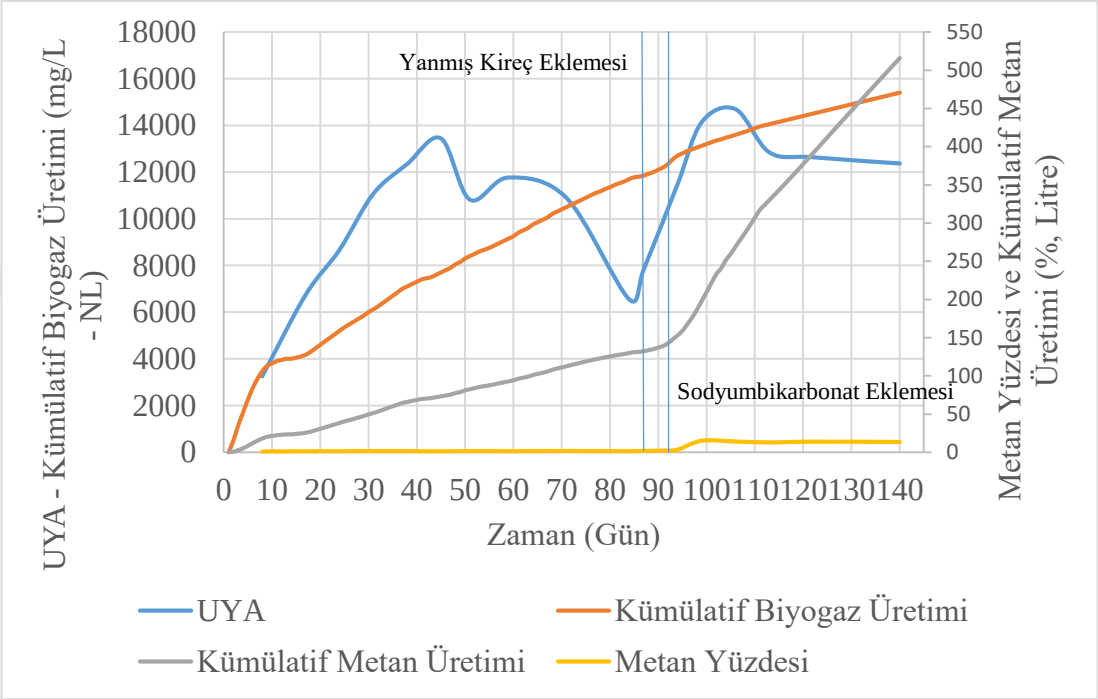
Şekil 3.30. Onuncu deney UYA, Alkalinite, pH grafiği

Şekil 3.30'da onuncu deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), alkalinite ve pH grafiği görülmektedir.

Ekleme işlemleri yapıldıktan sonra düşme eğiliminde olan UYA miktarı artmaya başlamış ve 106. günde UYA miktarı 14700 mg/L değerine çıkmıştır. Daha sonra 122. güne kadar azalarak 12850 mg/L değerine düşmüştür ve deneyin sonunda UYA miktarı 12375 mg/L seviyesinde kalmıştır.

Alkalinite değeri ekleme işleminden önce artma eğilimindedir. Ancak deneyin 80'li günlerine gelindiğinde pH değerinin halen 5,5 bandında olması nedeniyle alkali işlem yapılması düşünülmüş ve alkalinite değerinin arttırılması amaçlanmıştır. Ekleme işlemlerinden sonra alkalinite değeri artış göstermeye başlamış ve 94. günde 9090 mg/L değerine ulaşmıştır. Deneyin 113. Günüde 8217 mg/L değerine düştükten sonra tekrar artmaya başlamış ve alkalinite değeri deneyin sonunda 10098 mg/L değerine çıkmıştır.

Deneyin 84. gününde 5,28 olan pH değeri, yanmış kireç eklemesinden sonra 91. günde 6,02 değerine yükselmiştir. Sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) eklemesi yapıldıktan sonra deneyin 94. gününde pH seviyesi 7,49 seviyesine yükselmiştir. Ancak 99. günde pH seviyesi 6,13 seviyesine inmiş ve 106. güne kadar devam eden azalmayla beraber pH seviyesi 5,75'e inmiş ve deney sonunda kadar bu bantta kalmıştır.

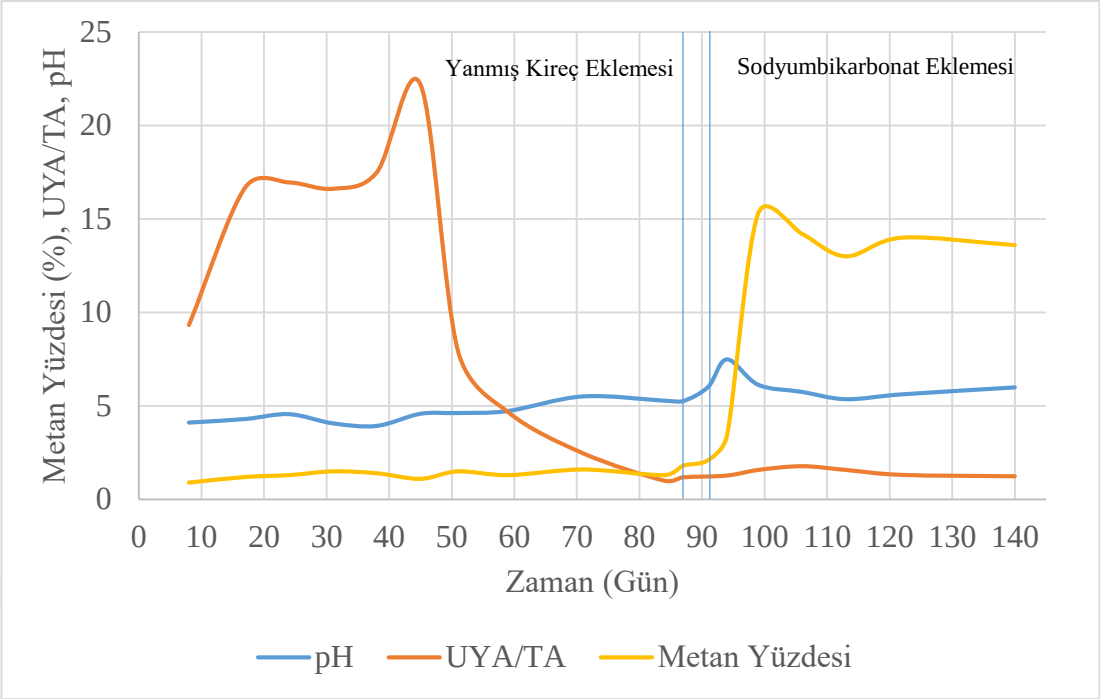


Şekil 3.31. Onuncu deney UYA, Metan Yüzdesi ve Kümülatif Biyogaz ve Metan Üretimi grafiği

Şekil 3.31'de onuncu deneye ait uçucu yağ asitleri (UYA), kümülatif biyogaz ve metan üretimi ile metan yüzdesi grafiği görülmektedir. Biyogaz üretiminin sürekli olarak arttığı görülmektedir.

Metan yüzdesi, yanmış kireç ve sodyum bikarbonat ($NaHCO_3$) eklemeleri yapıldıktan sonra pH değerinin 7,49 olduğu 94. günde % 1,5 seviyelerinden % 3,4'e çıkmıştır. Deneyin 99. gününde metan yüzdesi %15,3 değerine çıkmış ve deney sonuna kadar % 13 seviyelerinde kalmıştır. Şekil 3.33'te görüldüğü gibi deneydeki pH seviyesinin önce 7,49'a çıkıp daha sonra 5,5 seviyesine inmesi nedeniyle, % 1,5 seviyelerindeki metan yüzdesinin % 15'e çıkarılması sonrası metan yüzdesi artmamıştır.

Deneyin 94. gününde kümülatif metan üretimi 153 L iken artan metan oranı ile metan üretimi de artmış ve deney sonunda toplam 535 L Metan üretilmiştir.



Şekil 3.32. Onuncu deney Metan Yüzdesi, pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.32'de onuncu deneye ait uçucu yağ asitleri/toplam alkalinite (UYA/TA), pH ve metan yüzdesi grafiği görülmektedir.

Ekleme yapıldıktan sonra UYA/TA oranı 1,45 civarında stabil kalmıştır. Bu oranın sabit kalmasının nedeni, ekleme işlemleri sonrasında hem alkalinitenin hem de uçucu yağ asitlerinin artmasıdır. Metan üretiminin pH seviyesinin 7 bandında sabit kalmaması nedeniyle az olması, uçucu yağ asitlerinin yıkılmasına engel olmuş ve UYA/TA oranının azalmasının önüne geçmiştir.

3.2. Tartışma

3.2.1. Organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon sürecine etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin amaçlarında birisi organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesidir. Deneylerde atık olarak yerel bir pazardan toplanan sebze atığı, gübre olarak yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınan inek gübresi ve İZAYDAŞ yemekhanesinden alınan yemek atığı (insanların öğünlerinde yemedikleri ve/veya fazla pişirilen yemekler) kullanılmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneylerde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu kısımda birinci ve ikinci deneyler birbirleriyle karşılaştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Yapılan birinci ve ikinci deneylerde biyometan üretimi gerçekleşmemiştir. Uçucu yağ asidi üretimi birinci ve ikinci deneyde de 12000 mg/L seviyelerine çıkmış, ancak pH tamponundaki yetersizlik nedeniyle pH'ın 7'nin üzerine çıkmamasını takiben ortamdaki metanojenlerin üreyebilmesi ve metan üretmesi için gerekeli ortam sağlanamamıştır.

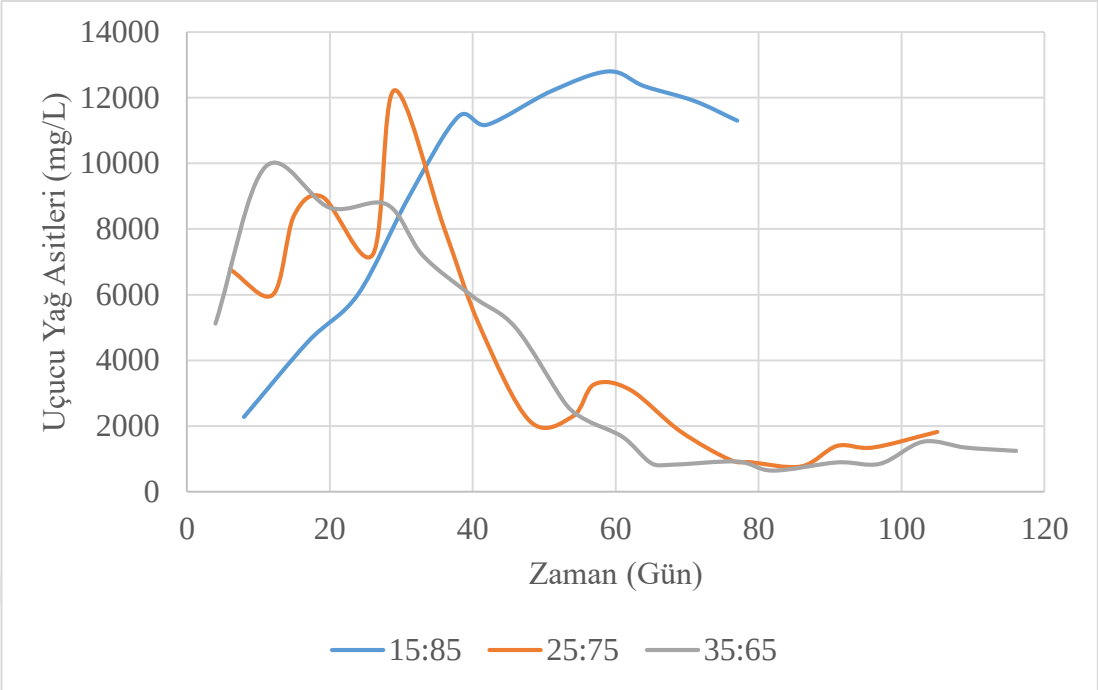
Bu deneylerin sonucunda deneylerde pazardan toplanan sebze atıkları kullanılmasına ve hayvansal gübre/organik atık oranının arttırılarak deneylere devam edilmesine karar verilmiştir.

Pişmiş yemek atıklarıyla deneylere devam edilmemiştir. Bunun nedeni, T. C. Cumhurbaşkanlığı himayelerinde gerçekleştirilen "Sıfır Atık" projesinde, öncelikli olarak israfın önlenmesi ve kaynakların daha etkin kullanılmasının amaçlanmasıdır. T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın 2017 yılında ana hizmet binasında uyguladığı sıfır atık çalışmalarında ekmek ve yemek atıkları kaynağında ayrı toplanmıştır. Toplanan 1 ton yemek atığı Ankara Büyükşehir Belediyesi ile yapılan protokol ile hayvan bakım ve rehabilitasyon merkezine gönderilmiştir ve hayvanların beslenmesi sağlanmıştır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).

Benzer bir uygulama İZAYDAŞ bünyesinde de gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Yemekhanede kaynağında ayrı toplanan yemek atıkları tesis içerisindeki belli noktalara boşaltılarak tesisteki hayvanların beslenmesi sağlanmaktadır. Yukarıdaki bilgiler ışığında bu tez çalışması kapsamında yemek atıkları ile daha fazla deney yapılmamasına karar verilmiştir.

3.2.2. Hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin amaçlarında birisi hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesidir. Deneylerde atık olarak yerel bir pazardan toplanan sebze atığı, gübre olarak yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınan inek gübresi kullanılmıştır. Mezofilik şartlarda (36±2 °C) gerçekleştirilen deneylerde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu kısımda birinci, üçüncü ve dördüncü deneyler birbirleriyle karşılaştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.



Şekil 3.33. Hayvansal gübre/organik atık oranı uçucu yağ asitleri grafiği

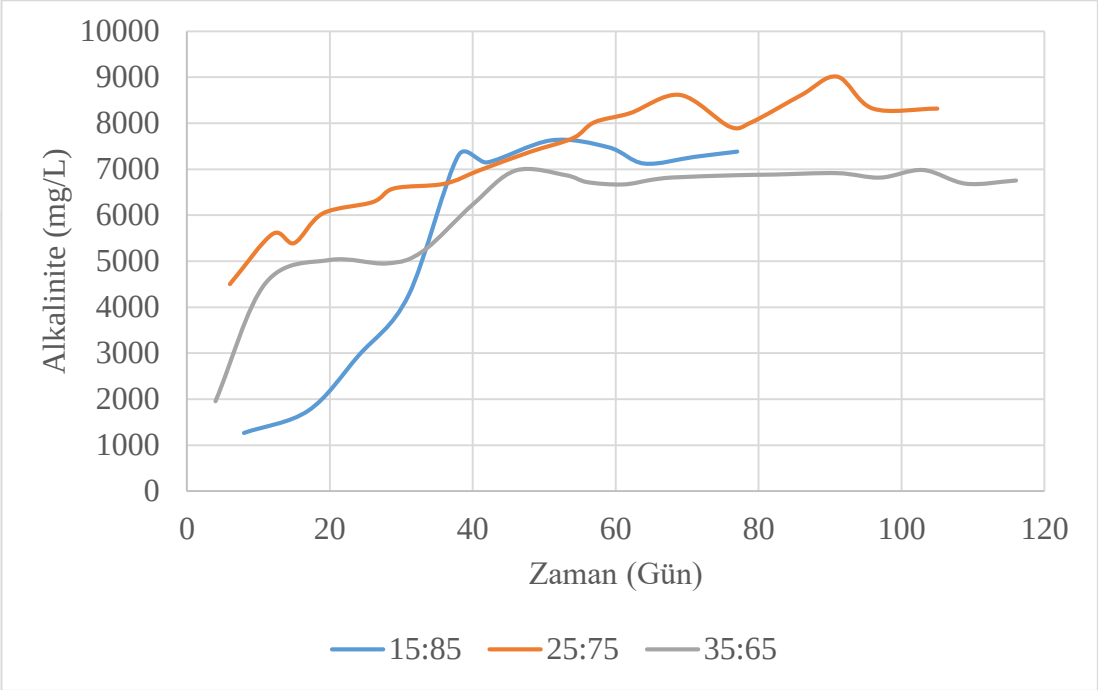
Şekil 3.33'de hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85, 25/75, 35/65 olan karışımların kuru fermantasyon sürecindeki uçucu yağ asidi miktarlarının zamanla değişimi verilmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deneyde uçucu yağ asidi üretimi ilk 38 gün artarak 11425 mg/L değerine çıkmıştır. Daha sonra küçük bir dalgalanmanın ardından uçucu yağ asidi üretimi devam etmiş ve 59. günde 12800 mg/L değerine çıkmış ve deney sonlandığında uçucu yağ asidi miktarı 11950 mg/L olmuştur. Bu atık/gübre oranında uçucu yağ asidi üretiminin sürekli olarak artması, uçucu yağ asidi yıkımının, yani metan üretiminin olmadığını işaret etmektedir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 olan deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 29. günde 12225 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 86. günde 775 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Deneyin sonlarına doğru UYA değeri 775-1825 mg/L seviyeleri arasında seyretmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 35/65 olan deneyde UYA miktarı 11. günde 9900 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 65. günde 870 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Deneyin sonlarına doğru UYA değeri 650-1530 mg/L seviyeleri arasında seyretmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deneyde metanlaşma olmadığı için UYA yıkımı gerçekleşmemiştir. Bununla beraber hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 ve 35/65 olan deneylerde metanlaşma gerçekleşmiş ve UYA üretimi ve yıkımı gözlenmiştir. Bu deneylerde ilk haftalarda UYA üretiminde dalgalanmalar gözlenmiştir. Benzer UYA üretim dalgalanmaları Li C. ve diğ., (2014), Arslan, (2017) ve Li H. L. ve diğ., (2014) çalışmalarında da gözlenmiştir.



Şekil 3.34. Hayvansal gübre/organik atık oranı alkalinite grafiği

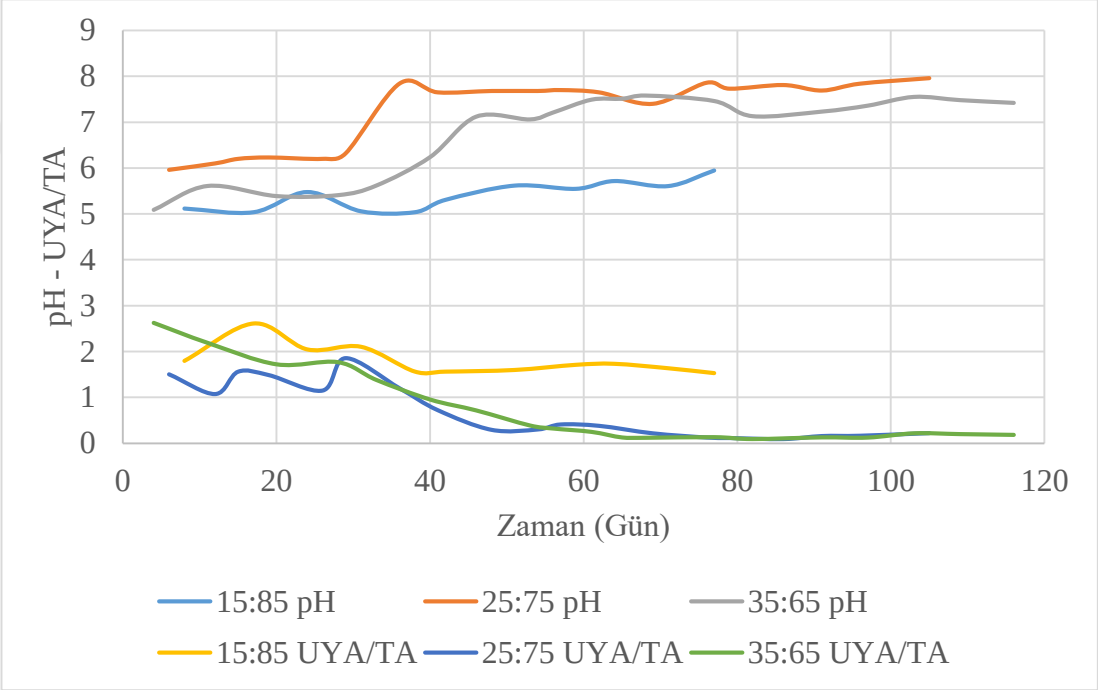
Şekil 3.34'de hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85, 25/75, 35/65 olan karışımların kuru fermantasyon sürecindeki alkalinite miktarlarının zamanla değişimi verilmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deneyde alkalinite değeri ilk 38 gün artarak 7297 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 7300 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 olan deneyde Alkalinite değeri artarak 36. günde 6683 mg/L değerine ulaşmıştır. Devam eden süreçte alkalinite değeri artmaya devam ederek 57. günde 8019 mg/L seviyesine çıkmış ve deney sonlanana kadar alkalinite değeri 8000-9000 mg/L bandından kalmıştır.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 35/65 olan deneyde alkalinite değeri artarak 46. günde 6969 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 6800 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

Alkalinite değeri tüm hayvansal gübre/organik atık oranlarında yaklaşık 40. güne kadar artmış ve daha sonra belli bir aralıkta sabit kalmıştır. Riggo ve diğ., (2017) ahıl yataklarıyla ve Forster-Carneiro ve diğ., (2007a) farklı kentsel katı atıkların organik fraksiyonları ile yaptıkları deneylerde, benzer alkalinite profilleri elde etmişlerdir.



Şekil 3.35. Hayvansal gübre/organik atık oranı pH ve UYA/TA grafiği

Şekil 3.35'te hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85, 25/75, 35/65 olan karışımların kuru fermantasyon sürecindeki pH miktarı ve UYA/TA oranlarının zamanla değişimi verilmiştir.

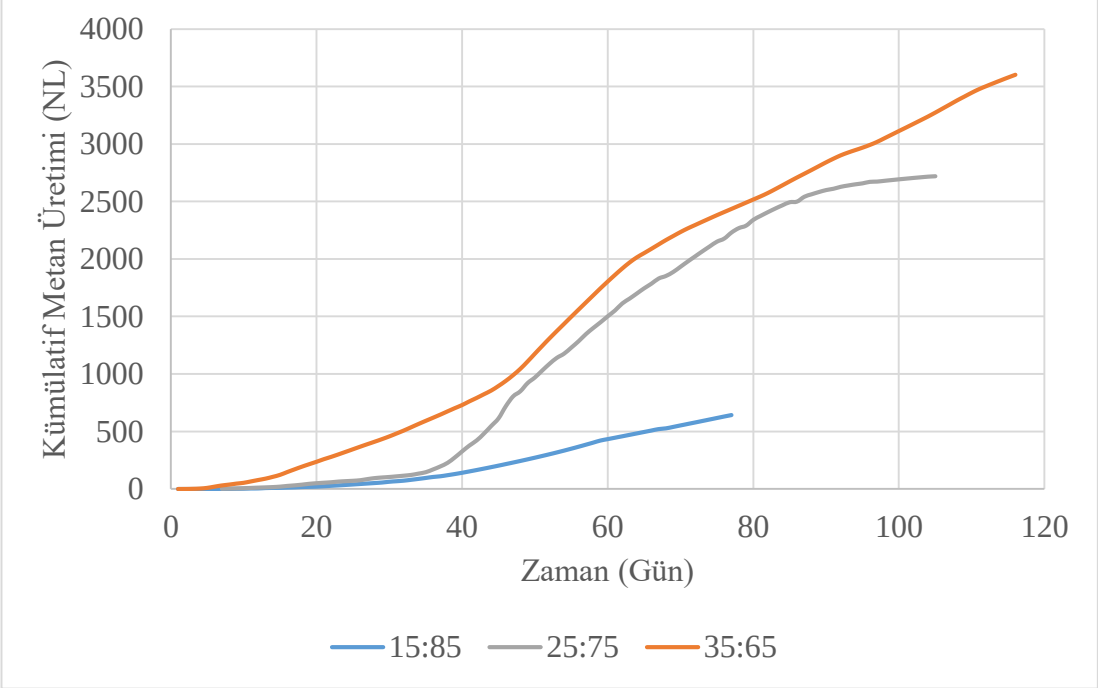
Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deney başlatıldığında pH değeri 5,12 olup deney süresince pH seviyesi 5-6 aralığında seyretmiştir. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 1,8 değerinde olup deney sonunda 1,53 değerine kadar düşmüştür.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 olan deney başlatıldığında pH değeri 5,96 olup 36. günde 7,84 değerine yükselmiştir. UYA/TA oranı deney başında 1,5

değerinde olup 48. güne kadar azalarak 0,29 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonlanana kadar bu oran 0,1-0,4 bandında kalmıştır.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 35/65 olan deney başlatıldığında pH değeri 5,09 olup 46. günde 7,12 değerine yükselmiştir. Alkalinitenin artışı pH'taki artışı sağlamıştır. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 2,62 değerinde olup 53. güne kadar azalarak 0,39 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonlanana kadar bu oran 0,1-0,3 bandında kalmıştır.

Metan üretimi pH değeri 7'yi geçtikten sonra, yani bazik ortamda daha aktif olarak gerçekleşmektedir (Weiland, 2010). Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deneyde pH değeri 7'yi geçememiştir. Ancak Hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 ve 35/65 olan deneylerde yaklaşık 40. günden sonra pH değeri 7'nin üzerine çıkmıştır. UYA/TA profilleri 25/75 ve 35/65 olan deneylerde benzer bir profil çizmiştir. Benzer UYA/TA grafiği Pezzolla ve diğ., (2017)'nin çalışmasında da gözlenebilmektedir.



Şekil 3.36. Hayvansal gübre/organik atık oranı kümülatif metan üretimi grafiği

Şekil 3.36'da hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85, 25/75, 35/65 olan karışımların kuru fermantasyon sürecindeki kümülatif metan üretimlerinin zamanla değişimi verilmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 15/85 olan deney süresince elde edilen kümülatif metan üretimi 68 NL CH_4/kgUOK$_{yüklenen}$ olmuştur.

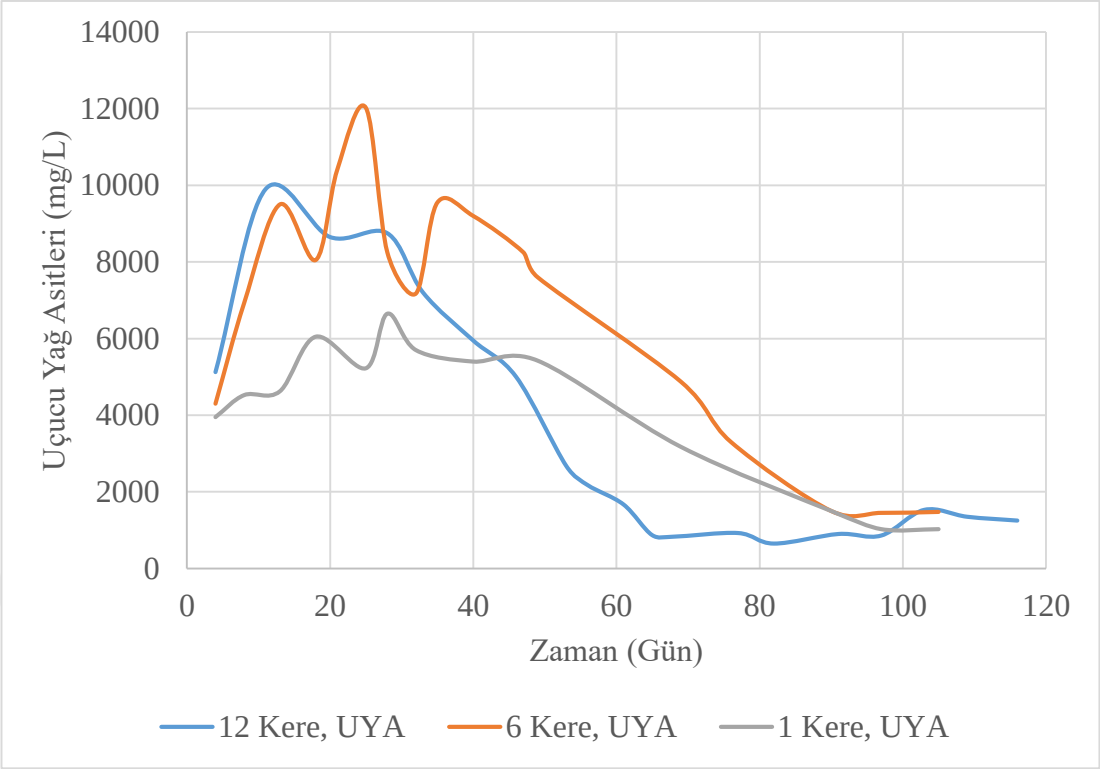
Hayvansal gübre/organik atık oranı 25/75 olan deneyde toplam 369 NL CH_4/kgUOK$_{yüklenen}$ metan üretilmiştir.

Hayvansal gübre/organik atık oranı 35/65 olan deneyin 430 NL CH_4/kgUOK$_{yüklenen}$ metan üretilmiştir.

Bolzonella ve diğ., (2006) farklı türde ayrıştırılmış kentsel katı atıklarla yaptıkları kuru fermantasyon deneylerinde metan üretimini 130-400 L CH_4/kgUOK, Shin ve diğ., (2001) 270 L CH_4/kgUK, Riggo ve diğ., (2017) ahıl yatakları ile yaptıkları deneylerde 168-206 NL CH_4/kgUK, Li ve diğ., (2013) mutfak atığından 541 L CH_4/kgUK meyve ve sebze atıklarından 342 L CH_4/kgUK metan elde etmiştir. Tez çalışmasında yapılan deneylerde elde edilen metan üretim verilerinin literatür ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

3.2.3. Perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin amaçlarında birisi perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesidir. Deneylerde atık olarak yerel bir pazardan toplanan sebze atığı, gübre olarak yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınan inek gübresi kullanılmıştır. Mezofilik şartlarda (36±2 °C) gerçekleştirilen deneylerde hayvansal gübre/organik atık oranı, önceki deneylerden elde edilen veriler ışığında 35/65 olarak seçilmiştir. Deneylerde günde 12, 6 ve 1 resirkülasyon, bir resirkülasyonda 39 litre olmak üzere perkolat suyu resirkülasyonu yapılmıştır. Bu kısımda dördüncü, beşinci ve altıncı deneyler birbirleriyle karşılaştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.



Şekil 3.37. Resirkülasyon miktarı uçucu yağ asitleri grafiği

Şekil 3.37'de 12, 6 ve 1 resirkülasyon yapılan, 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranlı karışımların biyometan üretim sürecindeki uçucu yağ asidi miktarlarının ve metan yüzdelerinin zamanla değişimi verilmiştir.

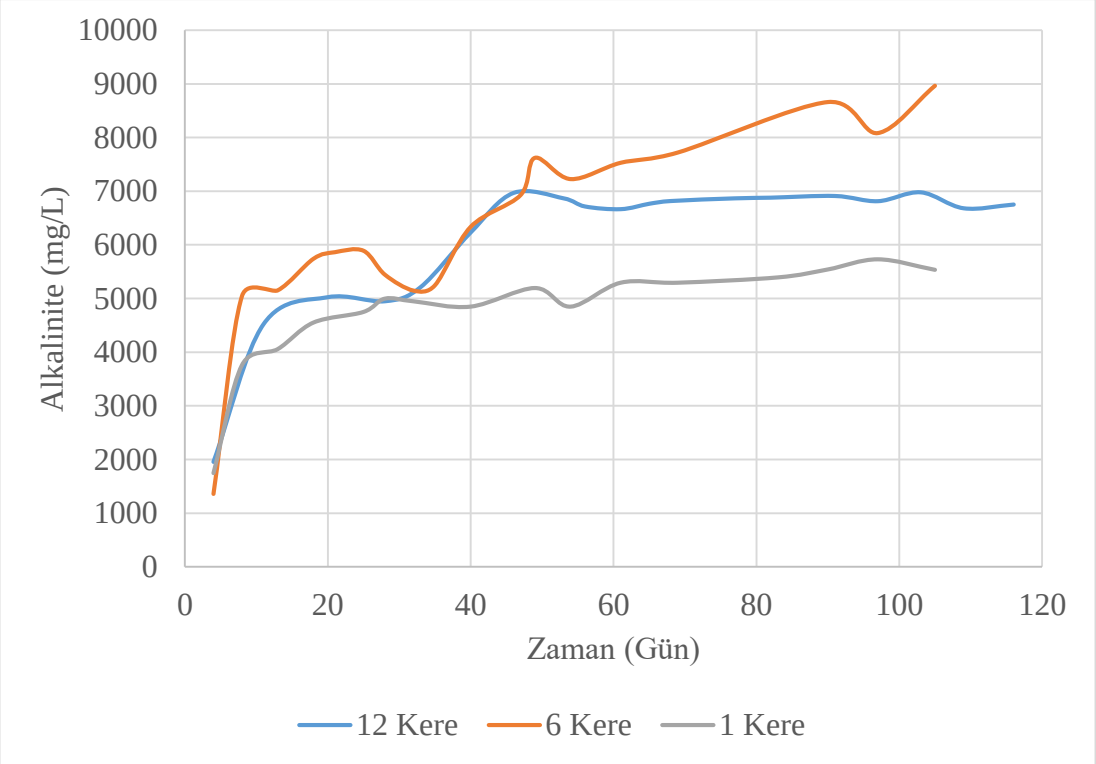
12 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 11. günde 9900 mg/L seviyesine gelmiştir. Daha sonra 65. günde 870 mg/L seviyesine kadar düşmüştür. Deneyin sonlarına doğru UYA değeri 650-1530 mg/L seviyeleri arasında seyretmiştir. Metan yüzdesi deney başlangıcından 53. güne kadar nerdeyse lineer bir artış göstermiştir ve metan yüzdesi % 64 seviyesine kadar artmıştır. Daha sonra 103. güne kadar düşmeye devam etmiş ve % 47,6 seviyelerine kadar inmiştir.

6 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra UYA miktarı 13. güne kadar lineer olarak artmış, 13. ve 40. günler arasında 12025 mg/L ile 7125 mg/L değerleri arasında dalgalanmış ve 90. günde 1500 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır. Metan yüzdesi deneyin 35. gününde % 19,6 seviyesinde iken, bu günden sonra metan üretimi hızlanarak 47. günde % 41,3 seviyesine çıkmıştır. Deneyin 69. gününde metan üretimi maksimum değeri olan %60,6 değerine ulaşmıştır. Daha sonra 76. günde % 52,3 değerine düşmüş ve 90. güne kadar % 52 seviyelerinde

seyretmiştir. Deneyin 90. gününden sonra metan yüzdesi düşmeye başlamış ve deney sonunda % 24,8 değerine kadar düşmüştür.

1 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra 28. güne kadar UYA miktarı 3950 mg/L ile 6650 mg/L değerleri arasında dalgalanmış, 32. ile 49. günler arasında 5500 mg/L değerleri arasında nerdeyse stabil kalmış ve 49. günden itibaren azalmaya başlayarak 97. günde 1025 mg/L seviyesine inerek deney sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır. Metan yüzdesi deneyin 28. gününde % 12,2 seviyesinde iken, bu günden sonra metan üretimi hızlanarak 49. günde % 31,6 seviyesine çıkmıştır. Deneyin 69. gününde metan üretimi maksimum değeri olan % 57,6 değerine ulaşmıştır. Daha sonra 76. günde % 54 değerine düşmüş ve 90. güne kadar % 52 seviyelerinde seyretmiştir. Deneyin 90. gününden sonra metan yüzdesi düşmeye başlamış ve deney sonunda % 35,4 değerine kadar düşmüştür.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında 12 resirkülasyon olan deneyde uçucu yağ asidi üretimindeki dalgalanmanın az olduğu ve metan yüzdesinin en erken bu deneyde % 60 seviyesini geçtiği gözlenmektedir.



Şekil 3.38. Resirkülasyon miktarı alkalinite grafiği

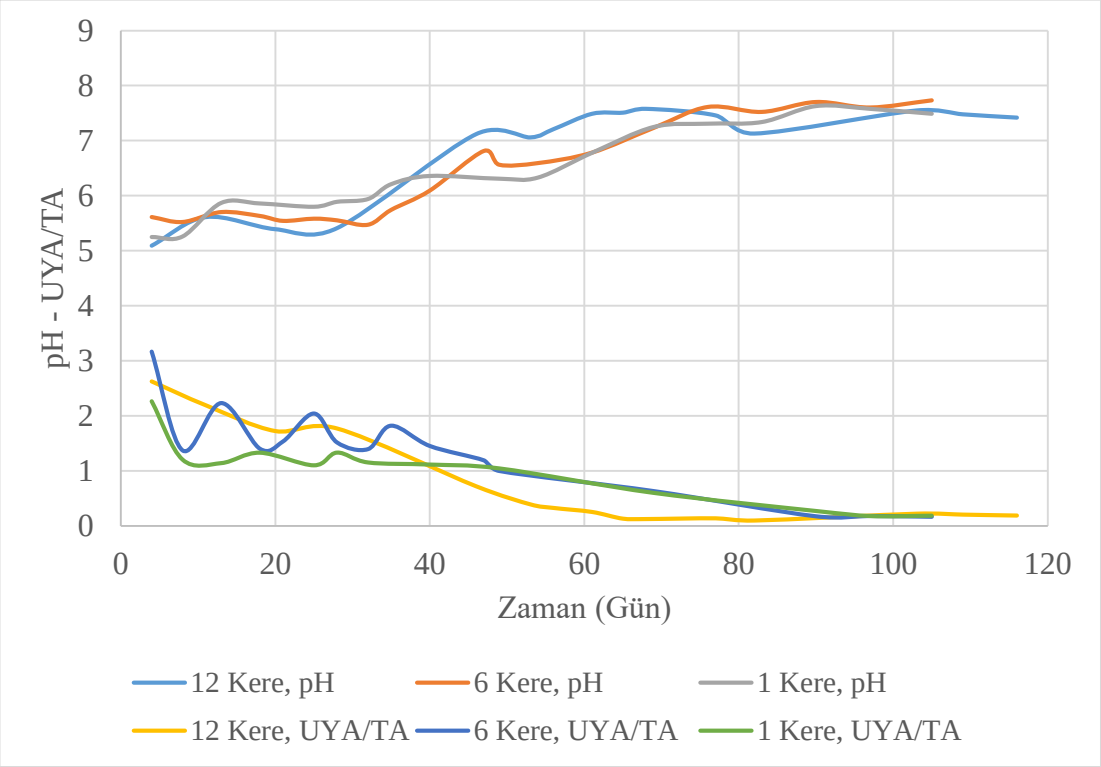
Şekil 3.38'de 12, 6 ve 1 resirkülasyon yapılan, 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranlı karışımların biyometan üretim sürecindeki alkalinite miktarlarının zamanla değişimi verilmiştir.

12 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra alkalinite değeri artarak 46. günde 6969 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 6800 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

6 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra alkalinite değeri 61. güne kadar dalgalanarak artarak 8910 mg/L değerine ulaşmıştır. Daha sonra deney sonlanana kadar alkalinite değeri ortalama olarak 8000 mg/L seviyelerinde stabil kalmıştır.

1 resirkülasyon yapılan deney başlatıldıktan sonra alkalinite değeri 1746 mg/L değeri ile başlamış ve 28. günde 5000 mg/L değerine ulaşmıştır. Deneyin 54. gününe kadar 5000 mg/L seviyelerinde seyreden alkalinite değeri 61. günde 5297 mg/L değerine ulaşmış ve deney sonuna kadar 5500 mg/L seviyelerinde seyretmiştir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında, 12 ve 1 resirkülasyon yapılan deneylerde alkalinite dalgalanmasının az olduğu, ancak en yüksek alkalinite değerlerine de günde 6 resirkülasyon resirkülasyon yapılan deneyde erişildiği gözlenmiştir.



Şekil 3.39. Resirkülasyon miktarı pH ve UYA/TA grafiği

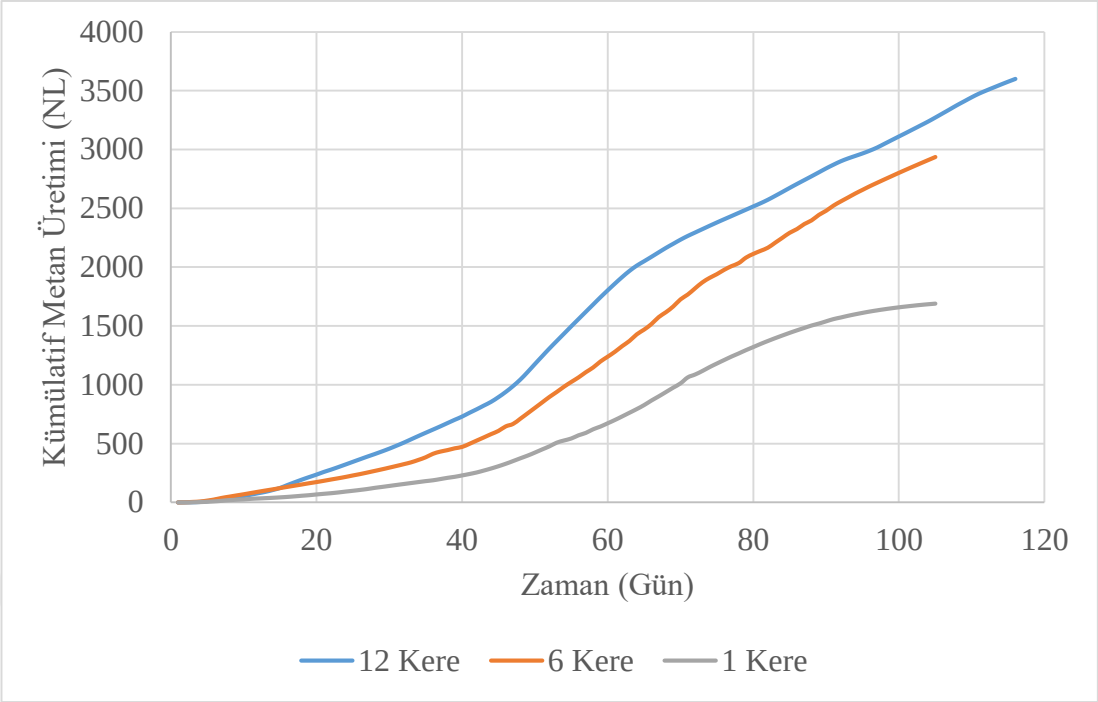
Şekil 3.39'da 12, 6 ve 1 resirkülasyon yapılan, 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranlı karışımların biyometan üretim sürecindeki pH miktarı ve UYA/TA oranlarının zamanla değişimi verilmiştir.

12 resirkülasyon yapılan deney başlatıldığında pH değeri 5,09 olup 46. günde 7,12 değerine yükselmiştir. Alkalinitenin artışı pH'taki artışı sağlamıştır. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 2,62 değerinde olup 53. güne kadar azalarak 0,39 seviyesine inmiştir. Daha sonra deney sonlanana kadar bu oran 0,1-0,3 bandında kalmıştır.

6 resirkülasyon yapılan deney başlatıldığında pH değeri 5,52 olup 69. günde 7,23 değerine yükselmiştir. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 3,16 değerinde olup 35. güne kadar dalgalanarak azalarak 1,82 seviyesine inmiş ve bu günden sonra neredeyse lineer bir azalımla 90. günde 0,17 seviyesine kadar inmiştir.

1 resirkülasyon yapılan deney başlatıldığında pH değeri 5,25 olup 13. ve 32. günler arasında 5,8 değerlerinde, 35. ve 54. Günler arasında 6.3 seviyelerinde seyrettikten sonra 69. Günde 7,25 değerine ulaşmıştır ve deney sonlanana kadar pH değeri 7-8 bandında kalmıştır. Deney başlangıcında UYA/TA oranı 2,26 değerinde olup 32. güne kadar dalgalanarak azalarak 1,15 seviyesine inmiş ve bu günden sonra neredeyse lineer bir azalımla 97. günde 0,17 seviyesine kadar inmiştir.

12 resirkülasyon yapılan deneyde pH değeri 46. günde 7,12 olmuş ve diğer deneylerle karşılaştırıldığında pH değeri 7'yi ilk geçen deney bu olmuştur. Ayrıca UYA/TA oranı 56. günde 0,32 değerine inmiştir ve 2041 L metan üretimi bu değerin altına inildikten sonra üretilmiştir. Pezzolla ve diğ. (2017) perkolat suyu resirkülasyonu ile süreç stabilitesinin arttığını ve UYA akümülasyonunun engellendiğini raporlamışlardır. Resirkülasyon miktarının arttıtılmasının uçucu katıların uçucu yağ asitlerine dönüşmesini ve hidroliz sürecinin arttığını, bunun ardı olarak da bir tampon sistem yarattığını ve metanojenik aktiviteyi iyileştirdiğini belirtmişlerdir. UYA/TA oranının 0,4-0,5 bandında olması sürecin stabil yürümediğini belirtmekle beraber günde 12 resirkülasyon resirkülasyon yapılan deneyde, 53. günden sonra UYA/TA değerinin 0,39'un altına inip deney sonuna kadar 0,1-0,3 değerleri arasında kalması optimum kabul edilen bir süreçtir (Di Maria ve diğ., 2014).



Şekil 3.40. Resirkülasyon miktarı kümülatif metan üretimi grafiği

Şekil 3.40'da 12, 6 ve 1 yapılan olan, 35/65 hayvansal gübre/organik atık oranlı karışımların biyometan üretim sürecindeki kümülatif metan üretimlerinin zamanla değişimi verilmiştir.

Yapılan 12, 6 ve 1 resirkülasyon deneylerinde metan üretimi sırasıyla 430, 332 ve 169 NL CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ olarak bulunmuştur. Bu bulgular, aralıklı çalışma usulü çalıştırılan pompalarla yapılan resirkülasyon işlemlerinde, çalışma aralığının uzaması ile metan üretiminin olumsuz etkilendiğini göstermektedir.

Kusch ve diğ., (2012) aralıklı ve kısa süreli pompa çalıştırmanın doğru bir resirkülasyon stratejisi olduğunu ve sürekli sirkülasyon yapmanın asitleşmeye neden olabileceğini belirtmiştir. Pezzola ve diğ., (2017) günde 4, 2 ve 1 resirkülasyon yaptıkları deneylerde, günde 4 resirkülasyon yapılan deneyde metan üretiminin diğerlerine göre daha fazla olduğunu belirtmiştir. Rico ve diğ., aralıklı çalışma usulü çalıştırılan pompalar ile yapılan perkolat resirkülasyonu işlemlerinde çalışma sıklığının arttırılmasının, fermantasyon sürecinin stabilitesini arttırdığını belirtmiştir.

Yapılan tez çalışmasında elde edilen bulguların literatür ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

3.2.4. Hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisi

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin amaçlarında birisi hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesidir. Deneylerde atık olarak yerel bir pazardan toplanan sebze atığı, gübre olarak yerel bir hayvan yetiştiricisinden alınan inek ve tavuk gübreleri ile endüstriyel bir tavuk çiftliğinden alınan topraksı yapıya sahip endüstriyel tavuk gübresi kullanılmıştır. Mezofilik şartlarda (37 °C) gerçekleştirilen deneylerde 12 resirkülasyon yapılmıştır. Bu kısımda dördüncü, yedinci ve sekizinci deneyler birbirleriyle karşılaştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Yedinci deneyde kullanılan tavuk gübresi endüstriyel bir tavuk çiftliğinden alınmıştır ve partiküllü yapısı nedeni ile sistemde tıkanmalara vesile olarak deneyin sonlanmasına neden olmuştur.

Sekizinci deneyde kullanılan tavuk gübresi yerel bir çiftçiden temin edilmiştir. Yerel çiftçilerden tavuk gübresi temin edilmesinin endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan yüksek tonajlar göz önüne alındığında pek mümkün olmayacağı düşünülmüştür. Ayrıca bu gübreyle de perkolat hattında tıkanma sorunları yaşanmıştır.

Diğer deneylerde inek gübresi kullanılmış ve atık/gübre oranı 35/65, 12 resirkülasyon yapılmış deneyde 430 NL CH_4/kg$UOK_{yüklenen}$ metan elde edilmiştir.

Tavuk gübresi kullanılmak istenildiği takdirde daha az resirkülasyonu yapılan konfigürasyonlar tercih edilebilir (Arslan K., 2017).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kentsel katı atıkların yönetilmesi, insanlığın daha sağlıklı koşullarda yaşayabilmesi için kritik önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, kaynağında atık ayrıştırmaya vurgu yapılmış ve ses tanıma teknolojisi kullanılarak ambalaj atıkların kaynağında ayrıştırılabileceği belirlenmiştir. Bu bulguyu takiben, atıkların ayrı toplanması sonucu elde edilebilecek ve organik atıkların toplu olarak toplanabileceği mahalle pazarları, süpermarketler ve sebze halleri gibi mekanlardan elde edilebilecek organik atıklar üzerine çalışmaya devem edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında bir garaj tipi kuru fermantasyon tesisi tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Kuru fermantasyon tesisinde; organik atık kompozisyonunun, hayvansal gübre/organik atık oranının, perkolat suyu resirkülasyon miktarının ve hayvansal gübre türünün kuru fermantaston yöntemi ile biyometan üretimi sürecine etkileri incelenmiştir.

Tasarlanan ve üretilen garaj tipi kuru fermantasyon tesisinde, atık bir fermantere doldurulmuş ve altında delikli yapı ile atığın içindeki suyun alt tarafta bir perkolat kabına dolması sağlanmış, daha sonra perkolat kabına dolan bu sızıntı suyu, bir pompa vasıtası ile atığın üzerine belirli periyotlarda resirküle edilmiştir.

Birinci ve ikinci deneylerde, organik atık kompozisyonunun kuru fermantasyon yöntemi ile biyometan üretim sürecine etkisi incelenmiştir. Bu deneylerin sonucunda, içinde pişmiş yemek atığı olan atık kompozisyonu ile metan üretimi neredeyse gerçekleşmemiştir. Bu deneylerin ve araştırmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Pişmiş yemek atıkları, mümkün olduğunca kuru fermantasyon süreci atık akımlarına dahil edilmemelidir, dahil edilmek isteniyorsa çeşitli aşı veya ko-fermantasyon substratları ile farklı oranlarda biyometan üretim deneyleri gerçekleştirilmelidir.

- Üretilen kentsel katı atıkların karaterizasyonu yapılmalı ve bu çalışmalar sürekli sürdürülmelidir.
- Yapılan karakterizasyon çalışmaları neticesinde üretilen atık türleri belirlenerek, bu atıkların kaynağında ayrılması için çalışmalar yapılmalıdır.
- Korucu ve diğ., (2016)yaptıkları çalışmalarda atıkların kaynağında ayırılması için ses tanıma teknolojisinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir.
- Üretilen atıkların kaynağında ayrı toplanması için, atığın üretildiği yerdeki valilik, belediye, üniversite, mahalle muhtarlıkları, apartman site vb. yöneticileri, sivil toplum örgütleri ve üniversiteler gibi paydaşlarla beraber çalışılmalıdır.
- Atığın üretildiği bölgenin coğrafi, ekonomik, demografik ve sosyokültürel yapısı gözetilmeli, ayrı toplama stratejileri buna göre düzenlenmelidir.
- Organik atıkların toplu olarak üretildiği mahalle pazarları, süpermarketler, manavlar, sürekli açık pazar alanları, restoranların toplu bulunduğu bölgeler vb. alanlarda pişmiş ve pişmemiş organik atıkların ayrı toplanması için eğitim ve bilinçlendirme çalışmaları yapılmalıdır.

Hayvansal gübre/organik atık oranının kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesi için yapılan birinci (15/85) ve üçüncü (25/75) ve dördüncü (35/65) deneylerin sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 15/85 inek gübresi: organik atık oranında yapılan kuru fermantasyon deneyinde metan üretimi diğer deneylere nazaran oldukça az kalmıştır. Bunun nedeni ortamın bazikleşmemesi ve metanojen popülasyonunun az olmasının olduğu düşünülmektedir. Bu deneyde 68 NL $CH_4/kgUOK_{yüklenen}$ metan üretimi gerçekleşmiştir.
- 25/75 inek gübresi: organik atık oranında yapılan deneyde, ortam kendiliğinden bazikleşmiş ve uçucu yağ üretiminin maksimuma ulaşmasının ardından, alkalinitenin artışını takiben bazikleşen ortamda, metanojenler uçucu yağ asidi yıkımını gerçekleştirmiş ve metan üretimi sağlanmıştır. Bu deneyde 369 NL $CH_4/kgUOK_{yüklenen}$ metan üretimi gerçekleşmiştir.
- 35:75 inek gübresi:organik atık oranında yapılan deneyde, ortam kendiliğinden bazikleşmiş ve üçüncü deneyde olduğu gibi metan üretimi gerçekleşmiştir. Bu deneyde 430 NL $CH_4/kgUOK_{yüklenen}$ metan üretimi gerçekleşmiştir.

- Yapılan bu deneylerle, fermantere yüklenen atık kompozisyonundaki inek gübresi oranının artmasının, metan üretimini arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, inek gübresiiçinde zaten varolan metanojen miktarının, inek gübresi miktarının arttırılması ile artması ve doğal olarak daha fazla metanojenin daha fazla metan üretmesi olabileceği düşünülmektedir.

Perkolat suyu resirkülasyon miktarının kuru fermantasyon sürecine etkisinin incelenmesi için yapılan dördüncü (12 resirkülasyon), beşinci (6 resirkülasyon) ve altıncı (1 resirkülasyon) deneylerin neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tüm deneylerde uçucu yağ asidi artışı ve yıkımı gerçekleşmiş, pH 7'nin üzerine çıkarak metanojenler için aktif bir ortam oluşmuştur.
- 12, 6 ve 1 resirkülasyon yapılan deneylerdeki metan üretimi sırası ile 430, 332 ve 169 NL $CH_4/kgUOK_{yüklenen}$ olarak bulunmuştur.
- Resirkülasyon miktarının arttırılmasının metan üretimini arttırdığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni fermanter içerisindeki kuru madde üzerinden birim zamanda geçen akışkan miktarının arttırılmasıyla artan mikrobiyolojik aktivite olarak açıklanabilmektedir.

Hayvansal gübre türünün kuru fermantasyon sürecine etkisinin araştırıldığı dördüncü, yedinci ve sekizinci deneyler sonucunda elde edilen buğular aşağıda verilmiştir.

- Endüstriyel tavuk gübresi kullanılan deneyde, tavuk gübresi içindeki katışkılar pompa hatlarında tıkanmalar meydana getirmiştir. Bu nedenle bir filtre kullanılmalı veya daha az resirkülasyon yapılan metotlar ile çalışılmalıdır.
- Evsel tavuk gübresi ile yapılan deneyde metanlaşma sağlanmıştır. Ancak evsel tavuk gübresi temini endüstriyel ölçekte zor olduğu için bu çalışmalara devam edilmemiştir.
- İleriki araştırmalarda, topraksı yapıdaki ve içinde taş kum gibi katışkılar bulunan tavuk gübreleri ile çalışılırken, tavuk gübresinin sulandırılarak içindeki kum, taş gibi pompaya ve hatlara zarar verecek partiküller temizlenerek deneyler yapılabilir.

Bu deneyler sonucunda, dizayn edilen garaj tipi kuru fermantasyon sistemine en uygun hayvansal gübrenin inek gübresi olduğu saptanmıştır.

Yapılan deneylerde en uygun hayvansal gübre/organik atık oranı 35/65, en uygun resirkülasyon miktarı günde 12 resirkülasyon ve en uygun hayvan gübresi inek gübresi olarak tespit edilmiştir. Yapılan bu deneyde 430 L $CH_4/kgVS_{yüklenen}$ metan elde edilmiştir.

Deneylerin 105 gün gibi uzun bir süre sürmesi, garaj tipi kuru fermantasyon süreçlerinde daha çok çalışma yapılması gerektiğini belirtmektedir. Bu nedenle gelecekteki araştırmalar bu sürecin termofilik şartlarda denemesi, asidojen aşamasını termofilik koşullarda ve metanojen aşamasının mezofilik şartlarda yapılması, asidohidroliz ve asetogenez fazlarını ile metanojen fazlarının ayrıldığı iki kademeli bir garaj tipi kuru fermantasyon tesisinin Qian ve diğ. (2016) dizayn edilmesi gibi çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Kaynağında ayrı toplanan pazar atıkları ile yapılan bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan yaralanarak, çöp kamyonları ile evlerden toplanarak İzaydaş'a getirilen evsel organik atıkların ayrıştırılarak yeni deney çalışma planları oluşturulabilir. Mevcut deneylerden elde edilen sonuçlar ile gerçek evsel çöplerle yapılan deneysel sonuçlar karşılaştırılarak endüstriyel tip kuru fermantasyon sistemleri tasarlanabilir. Bu sistemlerde ayrıca evsel çöplerin yanında substrat olarak atıksu arıtma çamuru da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Abbassi-Guendouz A., Trably E., Hamelin J., Dumas C., Steyer j. P., Delgenès j. P., Escudié R., Microbial Community Signature of High-Solid Content Methanogenic Ecosystems, *Bioresource Technology*, **133**, 256-262.

Agdag O. N., Sponza D. T., Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**, 75–85.

Ahring K. B., B*iomethanation II*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2003.

Alibardi L., Cossu R., Composition Variability of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Effects on Hydrogen and Methane Production Potentials, *Waste Management*, 2015, **36**, 147-155.

Al Seadi T., Owen N., Hellström H., Kang H., Source Separation of MSW, *IEA Bioenergy*, 5-23, 2013.

Antezana W., De Blas C., García-Rebollar P., Rodriguez C., Beccaccia A., Ferrer P., Cerisuelo A., Moset V., Estelles F., Cambra-Lopez M., Calvet S., Composition, Potentail Emissions and Agricultural Value of Pig Sulurry from Spanish Commercial Farms, *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2016, **104**, 159-173.

APHA Standart Metot 4500-NH_3, 4500-NH_3 Nitrogen (Ammonia), *Standard Methods Committee*, 1997.

Arslan K., Kentsel Organik Atıklardan Biyometan Üretimi İçin Yüksek Katı Madde Yüklemeli Özgün Biyoproses Konfigürasyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017, 479557.

Benbelkacem H., Bollon J., Bayard R., Escudié R., Buffière P., Towards Optimization of the Total Solid Content in High-Solid (Dry) Municipal Solid Waste Digestion, *Chemical Engineering Journal*, 2015, **273**, 261–267.

Bilgili M. S., Demir A., Özkaya B., Influence of Leachate Recirculation on Aerobic and Anaerobic Decomposition of Solid Wastes, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143**, 177-183.

Bolzonella D., Pavan P., Mace S., Cecchi F., Dry Anaerobic Digestion of Differently Sorted Organic Municipal Solid Waste: A Full-Scale Experience, *Water Science and Technology*, 2006, **53**, 23-32.

Bouallagui H., Lahdheb H., Romdan E., Rachdi B., Hamdi M., Improvement of Fruit and Vegetable Waste Anaerobic Digestion Performance and Stability with Co-Substrates Addition, *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**, 1844–1849.

Capson-Tojo G., Trably E., Rouez M., Crest M, Steyer J. P., Delgenès J. P., Escudié R., Dry Anaerobic Digestion of Food Waste and Cardboard at Different Substrate Loads, Solid Contents and Co-Digestion Proportions, *Bioresource Technology*, 2017, **233**, 166-175.

Chanakya H. N., Venkatsubramaniyam R., Modak J., Fermentation and methanogenic characteristics of leafy biomass feedstocks in a solid phase biogas fermentor, *Bioresource Technology*, 1997, **3**, 71-78.

Cysneiros D., Banks C. J., Heaven S., Karatzas G. K. A., The Effect of pH Control - and 'Hydraulic Flush' on Hydrolysis and Volatile Fatty Acids (VFA) Production and Profile in Anaerobic Leach Bed Reactors Digesting a High Solids Content Substrate, *Bioresource Technology*, 2012, **123**, 236-271.

Di Maria F., Sordi A., Micale C., Optimization of Solid State Anaerobic Digestion by Inoculum Recirculation: The Case of an Existing Mechanical Biological Treatment Plant, *Applied Energy*, 2012, **97**, 462-469.

Di Maria F., Sordi A., Cirulli G., Gigliotti G., Massaccesi L., Cucina M., Co-Treatment of Fruit and Vegetable Waste in Sludge Digesters. An Analysis of the Relationship Among Bio-Methane Generation, Process Stability and Digestate Phytotoxicity, *Waste Management*, 2014, **34**, 1603-1608.

Deublein D., Steinhauser A., *Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction*, Second Edition, Wiley-VCH, Weinheim, 2011.

El-Mashad M. H., Loon W. K. P., Zeeman G., Bot P. A. G., Lettinga G, Effect of Inoculum Addition Modes and Leachate Recirculation on Anaerobic Digestion of Solid Cattle Manure in an Accumulation System, *Biosystems Engineering*, 2006, **95**, 245-254.

Eurostat, *Energy, Transport and Environment Indicators 2018*, Publications Office of the European Union, European Union, 2018.

Fagbohungbe M. O., Dodd C. I., Herbert M. J. B., Li H., Ricketts L., Semple T. K., High Solid Anaerobic Digestion: Operational Challenges and Possibilities, *Environmental Technology & Innovation*, 2015, **4**, 268–284.

Ferna´ndez J., Pe´rez M., Romero L. I., Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), *Bioresource Technology*, 2008, **99,** 6075–6080.

Fernandez J., Perez M., Romero L. I., Kinetics of Mesophilic Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Influence of Initial Total Solid Concentration, *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 6322-6328.

Forster-Carneiro T., Pe´rez M., Romero L. I., Composting Potential of Different Inoculum Sources in the Modified SEBAC System Treatment of Municipal Solid Wastes, *Bioresource Technology*, 2007a, **98**, 3354-3366.

Forster-Carneiro T., Pe´rez M., Romero L. I., Sales D., Dry-Thermophilic Anaerobic Digestion of Organic Fraction of the Municipal Solid Waste: Focusing on the Inoculum Sources, *Bioresource Technology*, 2007b, **98**, 3195-3203.

Forster-Carneiro T., Pe´rez M., Romero I. L., Influence of Total Solid and Inoculum Contents on Performance of Anaerobic Reactors Treating Food Waste, *Bioresource Technology*, 2008, **99**, 6994-7002.

Gerardi H. M., *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.

Guisti L., A Review of Waste Management Practices and Their Impact On Human Health, *Waste Management*, 2009, **29**, 2227-2239.

Huber H., Thomm M., Konig H., Thies G., Stetter K. O., Methanococeus hermo-lithotrophicus, a novelt hermophilic lithotrophic methanogen, *Archives of microbiology*, 1982, **132**, 47–50.

Hussain A., Filiatrault M., Guiot S. R., Acidogenic Digestion of Food Waste in a Thermophilic Leach Bed Reactor: Effect of pH and Leachate Recirculation Rate on Hydrolysis and Volatile Fatty Acid Production, *Bioresource Technology*, 2017, **245**, 1-9.

Jha K. A., Li J., Nies L., Zhang L., Research Advances in Dry Anaerobic Digestion Process of Solid Organic Wastes, *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**, 14242-14253.

Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F., *What a Waste 2.0 A Global Snopshot of Solid Waste Management to 2050*, International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington, DC, 2018.

Khalid A., Arshad M., Anjum M., Mahmood T., Dawson L., The Anaerobic Digestion of Solid Organic Waste, *Waste Management*, 2011, **31**, 1737-1744.

Korucu M. K., Kaplan Ö., Büyük O., Güllü M. K., An Investigation of the Usability of Sound Recognition for Source Separation of Packaging Wastes in Reverse Vending Machines, *Waste Management*, 2016, **56**, 46-52.

Kothari R., Pandey A. K., Kumar S., Tyagi V. V., Tyagi S. K., Different Aspects of Dry Anaerobic Digestion for Bio-Energy: An Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **39**, 174-195.

Kusch S., Oechsner H., Jungbluth T., Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates, *International Journal of Environment and Waste Management*, 2012, **9**, 69-88.

Lee D. H., Behera S. K., Kim J., Park H. S., Methane Production Potential of Leachate Generated from Korean Food Waste Recycling Facilities: A Lab Scale Study, *Waste Management*, 2009, **29**, 876–82.

Li C., Mörtelmaier C., Winter J., Gallert C., Effect of Moisture of Municipal Biowaste on Start-Up and Efficiency of Mesophilic and Thermophilic Dry Anaerobic Digestion, *Bioresource Technology*, 2014, **168**, 23-32.

Li H. L., Guo X. L., Cao F. F. Wang Y., Process Evolution of Dry Anaerobic Co-digestion of Cattle Manure with Kitchen Waste, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 2014, **28**, 161-166.

Li R., Chen S., Li X., Lar S. J., He Y., Zhu B., Anaerobic Codigestion of Kitchen Waste with Cattle Manure for Biogas Production, *Energy & Fuels*, 2009, **23**, 2225-2228.

Li Y., Zhang R., Liu G., Chen C., He Y., Liu X., Comparison of Methane Production Potential, Biodegradability, and Kinetics of Different Organic Substrates, *Bioresource Technology*, 2013, **149**, 565–569.

Li Y., Jin Y., Borrion A., Li H., Li J., Effects of organic composition on mesophilic anaerobic digestion of food waste, *Bioresource Technology*, 2017, **244**, 213–224.

Li Y., Chen Y., Wu J., Enhancement of Methane Production in Anaerobic Digestion Process: A review, *Applied Energy*, 2019, **240**, 120-137.

Luo G., Xie L., Zhou Q., Angelidaki I., Enhancement of bioenergy production from organic wastes by two-stage anaerobic hydrogen and methane production process, *Bioresource Technology*, 2011, **102**, 8700-8706.

Madigan M., Martinko J., Stahl D., Clarck D., *Brock Biology of Microorganisms*, 13th ed., Pearson, San Francisco, 2010.

Martin D. J., Mass transfer limitations in solid-state digestion, *Biotechnology Letters*, 1999, **21**, 809-814.

Michele P., Giuliana D. Carlo M., Sergio S., Fabrizio A., Optimization of Solid State Anaerobic Digestion of the OFMSW by Digestate Recirculation: A New Approach, *Waste Management*, 2015, **35**, 111-118.

Moriarty K., A Study Prepared in Partnership with the Environmental Protection Agency for the RE-Powering America's Land Initiative: Siting Renewable Energy on Potentially Contaminated Land and Mine Sites, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/TP-7A30-57082, 11, 2013.

Neshat S. A., Mohammadi M., Najafpour G. D., Lahijani P., Anaerobic Co-Digestion of Animal Manures and Lignocellulosic Residues as a Potent Approach for Sustainable Biogas Production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **79**, 208-322.

Nizami A. S., Murphy J. D., What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**, 1558-1568.

Pagçev, Atık İstatistikleri, http://www.pagcev.org/atik-istatistikleri (Ziyaret tarihi: 23 Mayıs 2019)

Park Y., Tsuno H., Hidaka T., Cheon J., Evaluation of operational parameters in thermophilic acid fermentation of kitchen waste, *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2008, **10**, 46–52.

Parkin G. F., Owen W. F., Fundamentals of anaerobic digestion of waste-water sludges, *Journal of Environmental Engineering*, 1986, **112**, 867–920.

Pang Y. Z, Liu Y. P, Li X. J., Wang K. S., Yuan H. R., Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment, *Energy Fuels*, 2008, **22**, 2761–2766.

Pezzolla D., Di Maria F., Zadra C., Massaccesi L., Sordi A., Gigliotti G., Optimization of Solid-State Anaerobic Digestion Through the Percolate Recirculation, *Biomass and Bioenergy*, 2017, **96**, 112-118.

Pognani M., D'Imporzano G., Minetti C., Scotti S., Adani F., Optimization of Solid State Anaerobic Digestion of the OFMSW by Digestate Recirculation: A New Approach, *Waste Management*, 2015, **35**, 111-118.

Qian M. Y., Li H. R., Wedwitschka H., Nelles M., Stinner W., Zhou H. J., Industrial Scale Garage-Type Dry Fermentation of Municipal Solid Waste to Biogas, 2016, *Bioresource Technology*, **217**, 82-89.

Rico C., Montes J. A., Munoz N., Rico J. L., Thermophilic Anaerobic Digestion of the Screened Solid Fraction of Dairy Manure in a Solid-Phase Percolating Reactor System, *Journal of Cleaner Production*, 2015, **102**, 512-520.

Riggio S., Torrijos M., Debord R., Esposito G., van Hullebusch E. D., Steyer J. P., Escudié R., Mesophilic Anaerobic Digestion of Several Types of Spent Livestock Bedding in a Batch Leach-Bed Reactor: Substrate Characterization and Process Performance, *Waste Management*, 2017a, **59**, 129-139.

Riggio S., Torrijos M, Vives G., Esposito G., van Hullebusch E. D., Steyer J. P., Escudié R., Leachate Flush Strategies for Managing Volatile Fatty Acids Accumulation in Leach-Bed Reactors, Bioresource Technology, 2017b, 232, 93-102.

Romano R. T., Zhang R. H., Co-digestion of onion juice and waste water sludge using an anaerobic mixed bio film reactor, *Bioresource Technology*, 2008, **99**, 631–637.

Schievano A., D'Imporzano G., Malagutti L., Fragali E., Ruboni G., Adani F., Evaluation Inhibition Condition in High-Solid Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste, *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 5728–5732.

Shin H. S., Han S. K., Song C. Y., Lee C. Y., Multi-Step Sequential Batch Two-Phase Anaerobic Composting of Food Waste, *Environmental Technology*, 2001, **22**, 271-279.

Stafford D. A., Hawkes D. L., Horton R., *Methane Production from Waste Organic Matter*, Second Printing, CRC Press, United States, 1981.

Straif K., Cohen A., Samet J., *Air Pollution and Cancer,* International Agency for Research on Cancer, Lyon, 2013.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Sıfır Atık Projesi, Ankara, 2018.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği, 2017.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., *Intergrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues,* McGraw-Hill, New York, 1993.

The Atlas of Sustainable Development Goals 2018, The World by Income, The World Bank, http://datatopics.worldbank.org/sdgatlas/the-world-by-income.html (Ziyaret tarihi: 29 Nisan 2019)

TS 7159, Suyun Analiz Metotları-Amonyum Tayini-1. Kısım: Mauel Spektrofotometrik Metot, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1989

TS 9546 EN 12880, Çamurların karakterizasyonu- Kuru kalıntı ve su muhtevası tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

TS EN 12879, Çamurların özellikleri-Kuru kütlenin kızdırma kaybının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2003.

TS EN 15936, Çamur, arıtılmış biyoatık, toprak ve atık - kuru yakma ile toplam organikkarbonun (TOC) belirlenmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.

TS EN 16169, Atık, İşlenmiş biyo atık ve toprak- Kjeldahl azotu tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.

TUİK, İstatistiklerle Çevre 2016, Türkiye İstatistik Kurumu, 2018, http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=27685 (Erişim Tarihi: 29 Nisan 2019)

URL-1: http://sifiratik.gov.tr/SifirAtik/Nedir (Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2019).

URL-2: http://sad.fm/14 (Ziyaret tarihi: 5 Nisan 2018).

URL-3: http://ec.europa.eu/environment/waste/publications/pdf/compost_en.pdf (Ziyaret tarihi: 7 Nisan 2018).

URL-4: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69404/pb13529-waste-hierarchy-summary.pdf (Ziyaret tarihi: 11 Nisan 2019)

URL-5: https://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/The-DRANCO-technology-2012.pdf (Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2019)

URL-6: https://www.gicon.de/uploads/tx_sbdownloader/Biogasprospekt_EN_02.pdf (Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2019)

Vavilin V. A., Shchelkanov M. Y., Rytov S. V., Effect of mass transfer on concentration wave propagation during anaerobic digestion of solid waste, *Water Research*, 2002, **36**, 2405-2409.

Vavilin V. A., Rytov S. V., Lokshina L. Y., Pavlostathis S. G., Barlaz M. A., Distributed model of solid waste anaerobic digestion - Effects of leachate recirculation and pH adjustment, *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **81**, 66-73.

Veeken A. H. M., Hamelers B. V. M, Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste, *Water Science and Technology*, 2000, **41**, 255-262.

Verma S., Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Yüksek Lisans Tezi, Columbia University, Fu Foundation School of Engineering & Applied Science, 2002.

Vogt G. M., Liu H. W., Kennedy K. J., Vogt H. S., Holbein B. E., Super Blue Box Recycling (SUBBOR) Enhanced Two-Stage Anaerobic Digestion Process for Recycling Municipal Solid Waste: Laboratory Pilot Studies, *Bioresource Technology*, 2002, **85**, 291–299.

Walker D., Urban Biocycles, Ellen Macartur Foundation, 5-30, 2017.

Weiland P., Biogas Production: Current State and Perspectives, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85, 849-860.

Wellinger A. Process design of agricultural digesters. *Nova Energie GmbH Elggerstrasse*, 1999.

Wellinger A., Murphy J., Baxter D., The Biogas Handbook Science, Production and Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2013.

Wilson C. D., Global Waste Management Outlook, *International Solid Waste Association*, 52-61, 2015.

Xu S. Y., Karthikeyan O.P., Selvam A., Wong J. W. C., Microbial Community Distribution and Extracellular Enzyme Activities in Leach Bed Reactor Treating Food Waste: Effect of Different Leachate Recirculation Practices, *Bioresource Technology*, 2014, **168**, 41-48.

Yang S. T., Okos M. R., Kinetic Study and Mathematical Modeling of Methano-Genesis of Acetate Using Pure Cultures of Methanogens. *Biotechnology and Bioengineering* 1987, **30**, 661–667.

Yap S. D., Astals S., Jensen P. D., Batstone D. J., Tait S., Pilot-Scale Testing of a Leachbed for Anaerobic Digestion of Livestock Residues on-Farm, *Waste Management*, 2016, **50**, 300-308.

Yen H. W., Chiu C. H., The influences of aerobic–dark and anaerobic–light Cultivation on CoQ_{10} production by Rhodobacter sphaeroides in the submerged fermenter, *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **41**, 600–604.

Yenigün o., Demirel B., Ammonia Inhibition in Anaerobic Digestion: A Review, *Process Biochemistry*, 2013, **48**, 901-911.

Zhu J., Li Y., Experimental study on solid state anaerobic digestion of organic waste for methane production, *2009 annual ASABE meeting*, Reno, Nevada, ABD, 21-24 Haziran 2009.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Kaplan Ö., Çelik C., Woodchip Drying in a Screw Conveyor Dryer, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **4**, 2012.

Korucu K., **Kaplan Ö**., Büyük O., Güllü K., An Investigation of the usability of sound recognition for source separation of packaging wastes in reverse vending machines, *Waste Management*, 2016, **56**, 46-52.

Kaplan Ö., Çelik C., An experimental research on woodchip drying using a screw conveyor dryer, *Fuel*, 2018, **215**, 468–473.

Kibar M. E., Engintepe E., Özdemir E., **Kaplan Ö**., Çelik C., Akın A. N., Effect of morphology of activated carbon supports for cobalt boride catalysts on the hydrolysis reaction of sodium borohydride, *International Journal of Chemical Kinetics*, 2018, **50**(12), 839-845.

Yiğit K. S., **Kaplan Ö**., Two-Staged Wet Anaerobic Digestion of Landfill Leachate and Organic Waste: The Effect of Organic Waste Type on Biogas Production, *International Scientific Journal – Journal of Environmental Science*, 2016, **5**.

Kaplan Ö., Karabaş M. O., Dede Ş., Yiğit K. S., Batch Type Digestor Design Of A Pilot Sized Dry Anaerobic Digestion Facility Utilizing Food Waste, *2nd International Academic Research Congress*, Alanya, Antalya, Turkey. 18-21 Ekim 2017.

Kaplan Ö., Karabaş M. O., Yiğit K. S., Municipal Solid Waste Generation and Management in Kocaeli: 2023 Projections, *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Alanya, Antalya, Turkey, 3-5 Kasım 2016.

Korucu K., **Kaplan Ö.**, Güllü M. K., Büyük O., Using of SVM Sound Recognition Technique in Source Separation of Packaging Wastes: A New Approach for Reverse Vending Machines, *International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 24-28 Mayıs 2016.

Kaplan Ö., Gündüz M., Yiğit K. S., Two-Staged Biogas Production from Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) and Landfill Leachate, *22nd European Biomass Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 23-26 Haziran 2014.

Kaplan Ö., Yiğit K. S., Akın A. N., Akay R. G., Producibility of Bio-hydrogen from Organic Fraction of Municipal Solid Waste Using Dry Fermentation and Tri-Reforming Techniques in Kocaeli, *International Conference on Clean Energy*, İstanbul, Turkey, 8-12 Haziran 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırklareli'de tamamladı. Lisans öğrenimini 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde ve yüksek lisans öğrenimini 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2010 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.