

**BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ VE TAVUK
GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN ADM1
KULLANILARAK MODELLENMESİ**

**MODELLING OF BIOGAS PRODUCTION FROM CATTLE
MANURE AND CHICKEN MANURE USING ADM1**

Süleyman TUNÇEL

PROF. DR. AYŞENUR UĞURLU

TEZ DANIŞMANI

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

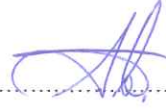
2017

SÜLEYMAN TUNÇEL' in hazırladığı "BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ VE TAVUK GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN ADMİ KULLANILARAK MODELLENMESİ" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANABİLİMDALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Hatice ŞENGÜL
Başkan



Prof. Dr. Ayşenur UĞURLU
Danışman



Doç. Dr. Beril S. AKIN
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun 14.07.2018 tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

14 / 07 / 2017

(İmza)

Süleyman TUNÇEL

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel sormlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünden bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22/06/2017

SÜLEYMAN TUNÇEL

ÖZET

BÜYÜKBAŞ HAYVAN GÜBRESİ VE TAVUK GÜBRESİNDEN BİYOGAZ ÜRETİMİNİN ADM1 KULLANILARAK MODELLENMESİ

Süleyman TUNÇEL

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşenur Uğurlu

Haziran 2017, 77 sayfa

Biyogaz santrali kurma aşmasında en önemli aşamalardan biri bu santrallerin gerçekçi bir şekilde modellenmesidir. Modelleme çalışması sayesinde kurulacak santral için uygun işletme koşulları belirlenebilmektedir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada arıtma tesislerinin modellenmesinde kullanılan ve düşük hata oranlarına sahip sonuçlar veren Anaerobik Arıtma Modeli No. 1 (ADM1) modeli uygulanmış; tavuk ve iki farklı organik içeriğe sahip büyükbaş atığının biyogaz üretim modellemesi yapılmıştır.

ADM1 modeli bir dizi dinamik ve denge sürecinden ve 200' ün üzerinde giriş parametresinden meydana gelmektedir. Modelde anaerobik reaktördeki arıtma sürecinde etkili olan mikroorganizmaların aktiviteleri deneysel sonuçlarla elde edilmiş matematiksel ifadeler ile tanımlanmıştır. Bununla birlikte, değişik sıcaklık ve organik yükleme hızlarında, farklı atık türlerini kullanarak analiz yapabilmek için model üzerinde çeşitli değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada da gereken düzenlemeler literatür çalışmalarında bulunan sonuçlar kullanılarak yapılmıştır.

Modelleme çalışması tavuk atığı ve yüksek organik içerikli sahip sığır atığı için 35 °C, 30 °C ve 25 °C sıcaklık altında, sırasıyla 1, 1.5 ve 2 kg.UKM/m³.g organik yükleme hızları (OYH) için gerçekleştirilmiştir. Düşük organik içerikli büyükbaş atığı için modelleme ise 35

°C sıcaklık altında OYH 2 kg.UKM/m³.g iken gerçekleştirilmiştir. Çalışmada biyogaz üretim miktarı, biyogaz metan içeriği, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi ve reaktör içindeki pH değeri incelenmiştir. Farklı organik içeriklere sahip atıklar için farklı modelleme koşulları altında model çıktıları karşılaştırılmış, en avantajlı durumlar ifade edilmiştir.

Modelleme çalışması sonucunda reaktör işletme sıcaklığının artırıldığı zaman biyogaz üretiminin ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin, pH düzeyinin arttığı, biyogazın metan içeriğinin çok önemli ölçüde değişmediği görülmüştür. Organik yükleme hızı artırıldığı durumda ise 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin ve pH düzeyinin düştüğü gözlemlenmiştir. Her koşul altında; tavuk atığından, analizi yapılan diğer iki farklı sığır atığına göre daha yüksek biyogaz miktarı ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi, pH düzeyi elde edilmiştir. Tahmin edildiği gibi yüksek organik içerikli sığır atığından her durumda düşük organik içerikli sığır atığına göre daha yüksek biyogaz miktarı ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi elde edilmiştir. ADM1 ile yapılan analiz sonucunda modelin literatürdeki deneysel çalışmalara uygun sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: biyogaz, anaerobik arıtma, anaerobik arıtma modeli, tavuk atığı, sığır atığı, metan gazı, biyoreaktör.

ABSTRACT

MODELLING OF BIOGAS PRODUCTION FROM CATTLE MANURE AND CHICKEN MANURE USING ADM1

Süleyman TUNÇEL

Master Degree, Department of Clean Renewable Energies

Supervisor: Prof. Dr. Ayşenur Uğurlu

June 2017, 77 pages

One of the most important steps in establishing a biogas plant is the realistic modeling of the biogas plants. With the modeling operation, suitable operating conditions can be selected for the biogas plants. From this point of view, in this study, the Anaerobic Treatment Model No 1 (ADM1) giving results which have low error rates used in the modeling of treatment plants model was applied and a biogas plants using chicken manure and two cattle waste with different organic contents were modeled.

The ADM1 model consists of a series of dynamic and steady-state processes and over 200 input parameters. In the model, the activities of microorganisms which are effective in the treatment process in the anaerobic reactor are defined by mathematical expressions obtained from experimental results. In order to be able to analyze by using different waste types at different temperatures and organic loading rates, various changes have to be made on the model. The necessary arrangements in this study were made using the results found in the literature studies.

The model study was carried out for organic loading rates (OLR) of 1, 1.5 and 2 kg VS / d m³ respectively at temperatures of 35 °C, 30 °C and 25 °C chicken waste and for cattle manure having high organic content. Modeling for bovine waste with low organic content was carried out at 35 °C for OLR of 2 kg VS / d m³. In order to compare cattle waste with

low and high organic content, the modeling work was carried out at a temperature of 35 °C and an organic loading rate of 2 kg VS / d m³. In this study, the amount of biogas production, the content of biogas methane, the biogas and methane production per gram of volatile solid material and the pH value in the reactor were investigated. Under the different modeling conditions, outputs are compared and the most advantageous situations are expressed.

As a result of the modeling study, it was observed that the biogas production and the biogas and methane production per gram of volatile solid material (VS) pH level were increased when the operating temperature was increased. Whereas methane content of the biogas was has not changed significantly. It has been observed that when the organic loading rate is increased, the biogas and methane production per gram of volatile solid material and pH level decreases. Higher organic content of chicken waste resulted in higher biogas production, the biogas and methane production per gram of VS under all conditions compared to cattle waste with high organic content. As expected, higher biogas and biogas, methane production per gram of VS were obtained in each case from cattle manure having high organic content than in cattle manure having low organic content. As a result of the analysis made with ADM1, it was observed that the model gave appropriate results to the experimental studies in the literature.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, anaerobic digestion model, chicken manure, cattle manure, methane, bioreactor.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmasının her aşamasında, değerli katkı ve bilgilerini paylaőan Sayın danışman hocam Prof. Dr. Ayşenur Uğurlu' ya ve akademik deneyimlerini benden esirgemeyen Hacettepe Üniuersitesin İşletme Bölümün' de Araştırma Görevlisi olan canım ablam Niray Tunçel' e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİSİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ANAEROBİK ARITMA.....	3
2.1. Anaerobik Arıtmanın Tarihi	3
2.2. Anaerobik Arıtma	5
2.2.1. Hidroliz Aşaması	5
2.2.2. Asit Oluşumu	6
2.2.3. Asetat Oluşumu.....	7
2.2.4. Metan Oluşumu	8
2.3. Anaerobik Arıtma Koşulları	9
2.3.1. pH.....	9
2.3.2. Sıcaklık.....	10
2.3.3. Karbon/Azot (C/A) Oranı	11
2.3.4. Bekletme Süresi.....	11
2.3.5. Organik Yükleme Hızı (OYH)	12
2.3.6. Karıştırma	13

2.4. Anaerobik Arıtma Modeli' nin (ADM1) Tarihsel Gelişimi	13
2.5. Anaerobik Arıtma Modelleme Yaklaşımının Avantajları	15
3. ANAEROBİK ARITMA MODELİ NO:1 (ADM1)	16
3.1. Biyokimyasal Süreçler.....	16
3.2. Fizikokimyasal Süreçler	19
3.3. ADM NO:1 Modelinin Matematiksel Uygulaması	20
3.4. Substrat Karakterizasyonu	24
3.5. ADM1 Modeli Uygulamaları	27
4.UYGULAMA	39
5. BULGULAR TARTIŞMA VE SONUÇ	43
5.1. Büyükbaş Hayvan Gübresinden (Yüksek Organik İçerikli) Biyogaz Üretiminin Modellenmesi	43
5.1.1. Substrat A Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	43
5.1.2. Substrat A Set 2 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	44
5.1.3. Substrat A Set 3 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	45
5.1.4. Substrat A Set 4 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	46
5.1.5. Substrat A Set 5 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	47
5.1.6. Substrat A Set 6 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	48
5.1.7. Substrat A Set 7 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	48
5.1.8. Substrat A Set 8 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	49
5.1.9. Substrat A Set 9 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları.....	50
5.2. Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretiminin Modellenmesi	51
5.2.1 Substrat B Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	51
5.2.2. Substrat B Set 2 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	52
5.2.3. Substrat B Set 3 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	52
5.2.4. Substrat B Set 4 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	53
5.2.5. Substrat B Set 5 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	54

5.2.6. Substrat B Set 6 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	54
5.2.7. Substrat B Set 7 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	55
5.2.8. Substrat B Set 8 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	56
5.2.9. Substrat B Set 9 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	57
5.3. Düşük Organik İçeriğe Sahip Büyük Baş Hayvan Gübresinin Modellenmesi.....	57
5.3.1 Substrat C Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları	58
5.4. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayıların Üzerinde Hassasiyet Analizi Sonuçları.....	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
7. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI	67
8. KAYNAKLAR.....	68
9. EKLER	72
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ŞEKİLLER DİZİSİ

Şekil 1. Biyokimyasal süreçleri içeren Oksijensiz çürüme modeli.	19
Şekil 2. ADM1'deki sürekli karışimli reaktör tankı	21
Şekil 3. Modelde kullanılan inhibisyon eşitlikleri.....	23
Şekil 4. Yarışmasız İnhibisyon.....	24
Şekil 5. Substrat içeriğinin Weender analizi ile belirlenmesi.....	25

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. Hidroliz reaksiyonunun girdileri ve çıktıları.....	6
Tablo 2. Stokiyometrik ifadelerin eşitlikleri.....	27
Tablo 3. Stokiyometrik değerlerin çim silajı için uygulanması [18].....	29
Tablo 4. Azot barındıran maddelerin azot içerikleri [18].....	29
Tablo 5. Tavuk gübresi için Weender Analizi sonuçları [22]	30
Tablo 6. Satpathy vd. (2013) çalışmasında kalibre edilen model parametreleri	31
Tablo 7. Çalışmada kalibre edilen parametreler. [23]	34
Tablo 8. Substratlara göre kalibre edilen f-faktörleri [29].....	35
Tablo 9. Substrata göre kalibre edilmiş toplam kinetik oranlar [29].....	36
Tablo 10. Page vd.' nin (2008) çalışmasında değiştirilen model giriş parametreleri.....	37
Tablo 11. Sığır atığına (birinci substrat) göre değiştirilen model parametreleri [32].....	40
Tablo 12. Üçüncü substrata göre değiştirilen model parametreleri [33]	41
Tablo 13. Kinetik parametrelere ait sıcaklık çarpanları.	41
Tablo 14. Modelleme Koşulları.....	43
Tablo 15. Substrat A Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları	44
Tablo 16. Substrat A Set 2 Koşulları Altında Model Sonuçları	44
Tablo 17. Substrat A Set 3 Koşulları Altında Model Sonuçları	45
Tablo 18. Substrat A Set 4 Koşulları Altında Model Sonuçları	46
Tablo 19. Substrat A Set 5 Koşulları Altında Model Sonuçları	47
Tablo 20. Substrat A Set 7 Koşulları Altında Model Sonuçları	48
Tablo 21. Substrat A Set 8 Koşulları Altında Model Sonuçları	49
Tablo 22. Substrat A Set 9 Koşulları Altında Model Sonuçları	50
Tablo 23. Substrat B Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları	51
Tablo 24. Substrat B Set 2 Koşulları Altında Model Sonuçları	52
Tablo 25. Substrat B Set 3 Koşulları Altında Model Sonuçları	52
Tablo 26. Substrat B Set 4 Koşulları Altında Model Sonuçları	53
Tablo 27. Substrat B Set 5 Koşulları Altında Model Sonuçları	54
Tablo 28. Substrat B Set 6 Koşulları Altında Model Sonuçları	54
Tablo 29. Substrat B Set 7 Koşulları Altında Model Sonuçları	55
Tablo 30. Substrat B Set 8 Koşulları Altında Model Sonuçları	56
Tablo 31. Substrat B Set 9 Koşulları Altında Model Sonuçları	57
Tablo 32. Substrat C Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları	58

Tablo 33. Özet Tablo	60
Tablo 34. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayılarının Biyogaz Üretimi Üzerine Etkisi	62
Tablo 35. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayılarının Metan Gazı Üretimi Üzerine Etkisi	62
Tablo 36. Değiştirilen Model parametre ve Katsayılarının Karbondioksit Gazı Üretimi Üzerine Etkisi.....	62
Tablo 37. Sıvı haldeki İnhibitörler için biyokimyasal hız katsayıları ve kinetik hız denklemleri (i=1-12, j=1-19).....	73
Tablo 38. Partikül haldeki inhibitörler için biyokimyasal hız katsayıları ve kinetik hız denklemleri (i=13-24, j=1-19).....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

KISALTMALAR

kWh	kiloWatt hour (kilowatt saat)
MWp	Megawatt Electric Power
ADM1	Anaerobik Digestion Model (Anaerobik Arıtma/Çürüme Modeli)
UKM	Uçucu Katı Madde
OPEC	Petrol İhracat Eden Ülkeler
ÇBS	Çamur Bekleme Süresi
HBS	Hidrolik Bekleme Süresi
OYH	Organik Yükleme Hızı
IAWQ	International Association on Water Quality
ASM1	Activated Sludge Model No.1
ASM2	Activated Sludge Model No.2
ASM2d	Activated Sludge Model No.2d
ASM3	Activated Sludge Model No.3
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
UZYA	Uzun Zincir Yağ Asitleri
VFA	Volatile Fatty Acids
TKM	Toplam Katı Madde
UK	Uçucu Katı
HP	Ham Protein
HL	Ham Lipit
RF	Ham Yağ
SAÖ	Serbest Azot Özü

NDL	Nitrojen deterjan Lif
ADL	Azot deterjan Lif
ADLG	Asit Deterjan Lignin
ADLİF	Asit Deterjan Lif
HLİF	Ham Lif
AÖM	Azot Öz Madde
TOEDx	Teorik Oksijen İhtiyacı

SİMGELER

CO ₂	Karbondioksit
CH ₄	Metan
NH ₄	Amonyak
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
C ₆ H ₁₀ O ₄	Adipik Asit
C ₆ H ₁₂ O ₆	Basit Şeker
CH ₃ CH ₂ OH	Propenal
CH ₂ CH ₂ COOH	Propionik Asit
CH ₂ CH ₂ COO ⁻	Propiyonat
CH ₃ COOH ⁻	Asetik Asit
H ⁺	Hidrojen İyonu
HCO ₃	Bikarbonat
CH ₃ CH ₃ OH	Etıl Alkol
C/N, K/A	Karbon Azot Aranı
°C	Santigrat Derece
kmole	Kilo Mol

d^{-1}	1/gün
d	Selüloz ve hemiselülozün bozunabilir tarafı
Dvs	Bozunabilirlik Düzeyi
f-faktörleri	Stokiyometrik Faktörler
m^3	metreküp
ml	mililitre
lt	litre
NL	Normal Litre

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışıyla birlikte nerdeyse tüm sektörlerdeki üretim miktarı artmıştır. Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için yapılan üretim sonucunda yüksek miktarlarda organik veya inorganik atık oluşmaktadır. Oluşan yüksek miktardaki atığın yönetimini ve verimli bir şekilde değerlendirilmesini sağlayan uygulamalar, insan sağlığı ve çevre güvenliğinin garanti altına alınması ve sürdürülebilir ülke ekonomisi kurulmasında önemli bir role sahiptir. Günümüzde, anaerobik arıtma organik maddelerin atık yönetim uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Anaerobik arıtma kısaca organik maddelerin oksijensiz (havasız) ortamda anaerobik mikroorganizmalar tarafından bertaraf edilmesidir. Anaerobik arıtma sayesinde evsel, kentsel, yemekhane atıklarını, tarımsal ve hayvansal atıkları bertaraf edilebilmektedir. Organik maddelerin anaerobik arıtımı güvenli bir atık yönetim uygulaması olmasının yanında, arıtma işleminin sonucunda ortaya çıkan biyogazın enerji üretiminde kullanılabiliyor olması, anaerobik arıtma işlemini ekonomik olarak tercih edilebilir bir noktaya taşımaktadır.

Yukarıda bahsedilen anaerobik arıtmanın sağladığı ekonomik değer ve çevre güvenliği göz önüne alınarak ülkemizde anaerobik uygulamayla açığa çıkan biyogazdan üretilen elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik kapsamına alınmış ve bu üretilen elektriğe sabit fiyattan alım garantisi sağlanmıştır. 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunu” na göre biyogazdan üretilen elektrik enerjisinin 1 kilowatt saat (kWh)’ına 13.3 cent (Amerikan Doları) fiyattan 10 sene alım garantisi verilmiştir [1]. Ülkemizde destek programından faydalanan 39 tane, anaerobik arıtma yoluyla biyogaz üreten santral bulunmaktadır. Bu santraller arasında Odayeri çöp gazı santrali 33MWe (Megawatt Electric Energy) gücüyle dikkat çekmektedir. Bu santral sayesinde İstanbul Avrupa Yakası’nın çöpleri bertaraf edilmekte ve açığa çıkan biyogaz sayesinde önemli ölçüde elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Anaerobik arıtma yöntemiyle biyogaz üreten santrallerin kurulumundaki önemli aşamalardan biri, santralin modellenerek santraldeki çıktı parametrelerinin tahminlerinin yapılmasıdır. Anaerobik arıtma santrallerinin modellemesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Anaerobic Digestion Model No:1(ADM1)’dir. Bu model sayesinde biyogaz üretim miktarı ve biyogazın içeriği gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Buna ek olarak, tarımsal, hayvansal, evsel, kentsel vb. organik içeriğe

sahip atıkları kullanan biyogaz santrallerinin modellenmesi yapılabilmektedir. Bu yaklaşım ile biyogaz santrallerinin fizibiliteleri doğru bir şekilde yapılabilmekte; doğru ölçekte santraller kurularak, düşük kapasite sorununun ve/veya atıl kapasitenin ortaya çıkması engellenebilmektedir.

Yukarıdaki açıklamalardan yola çıkarak, bu çalışmanın amacı; hayvansal atık olan tavuk ve büyükbaş gübresini kullanan biyogaz santrallerinin ADM1 ile modellenmesinin uygunluğu incelenmesi; uygun model parametrelerinin seçilerek gerçekçi model çıktılarının elde edilmesi; tavuk ve 2 farklı organik özelliğe sahip sığır gübresi üzerinde modelleme çalışması yardımıyla atıkların biyogaz potansiyellerinin, biyogazın metan içeriğinin ve 1 gram uçucu katı madde (UKM) başına biyogaz ve metan üretim değerlerinin tespit edilmesi ve karşılaştırılmasıdır.

Modelleme çalışması farklı işletme koşulları altında ve organik yükleme hızlarında gerçekleştirilmiş, model parametreleri revize edilerek farklı işletme koşullarında model çıktıları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, aynı türde fakat farklı organik içeriklere sahip olan atıkların modellenmesinde, modelin parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak gerçekçi sonuçlar elde edilmesi ve substratlara ait model çıktıılarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. ADM1 modelinin seçilmesinin nedeni ise modelde yapılan değişiklikler sayesinde farklı organik içeriklere sahip tavuk ve büyükbaş atıklarının rahatlıkla ve doğru bir şekilde modellenebilmesine imkân sağlamasıdır.

ADM1 modeli Matlab yazılım programı ile kodlanmış ve Rosen vd.'nin (2006) çalışmasında önerildiği hali ile uygulanmıştır. Ancak bu çalışmada modelin giriş parametreleri literatürdeki parametrelere uygun olarak değiştirilmiştir. Modelleme çalışmaları 35 °C, 30 °C ve 25 °C sıcaklıklar altında ve her sıcaklık için sırasıyla 2, 1.5 ve 1 kg UKM/m³ organik yükleme hızlarında yapılmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak anaerobik arıtma süreci ele alınmakta, ADM1 modeli tanıtılarak modelin literatür uygulamalarına yer verilmektedir. Daha sonra modelin ADM1 modelinin uygulanma süreci, analiz ve bulgular detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Son olarak elde edilen sonuçlar kapsamında yapılan önerilere yer verilmektedir.

2. ANAEROBİK ARITMA

Bu bölümde öncelikle anaerobik arıtmanın tarihsel gelişim süreci, daha sonra anaerobik arıtmanın ne olduğu ve nasıl gerçekleştiği anlatılmakta ve bununla birlikte anaerobik arıtma sürecini etkileyen faktörler detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

2.1. Anaerobik Arıtmanın Tarihi

Anaerobik arıtmanın kullanımı Asurlulara dayanmaktadır. Asurlular anaerobik arıtma ile üretilen biyogazı banyo sularını ısıtmak için kullanıyorlardı. Tarihsel olarak 17. Yüzyıla kadar anaerobik arıtma önemli bir alana sahip değildi. Avrupa'da 17. Yüzyılda çürüyen organik maddelerin yanıcı gazlar ürettiği anlaşılmıştır. Count Alessandro Volta tarafından, çürüyen organik maddelerin miktarı ile üretilen yanıcı gaz miktarı arasında bir ilişki olduğu ortaya konulmuştur. Sör Humphry Davy 1808 yılında, büyükbaş hayvan gübresini oksijensiz çürümeye maruz bırakarak metan gazı üretmiştir[2]. Yaşanan bu gelişmeler sayesinde 19. Yüzyıldan itibaren anaerobik arıtma önem ve kullanım alanı kazanmaya başlamıştır.

Tarihte ilk endüstriyel düzeyde anaerobik arıtma tesisi 1859 yılında Hindistan'ın bir şehri olan Bombay'da faaliyete geçirilmiştir. 1895 yılında Exeter şehrinde kanalizasyon çamurundan biyogaz elde edilerek sokak lambalarında yakıt olarak kullanılmasıyla anaerobik arıtma İngiltere'ye giriş yapmıştır. 1930 yılında mikrobiyoloji alanında yaşanan gelişmeler bilim adamlarının anaerobik arıtma sayesinde üretilen gazın mekanizmasının belirlenmesine imkân vermiştir[2]. Aynı yılda Buswell tarafından yürütülen çalışmada, metan gazı üreten bakteriler ve metan gazı üretimi için gerekli olan ortam koşulları bulunmuştur[2].

1920 yılından önce anaerobik arıtma işlemleri anaerobik göletlerde yapılmaktaydı. Anaerobik arıtmanın süreç kontrolü ve bu kontrolün yarattığı fayda anlaşılınca, çok yönlü ekipmanlar ve operasyonel teknikler açığa çıkmıştır. Sonuç olarak anaerobik arıtma sistemine kapalı tanklar ve ısıtma, karıştırma ekipmanları entegre edilerek sistemin optimizasyonu sağlanmıştır ve iyileştirmeler sayesinde dünyada anaerobik arıtmanın kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. İlk ticari uygulamalar hayvan çiftliklerinde ortaya çıkmakta, bu uygulamalarda hayvan gübresi ısınma amaçlı kullanılacak gaz için çürütülmekteydi. Ancak daha sonra bu üretilen gaz, elektrik enerjisi üretimi için de kullanılmaya başlanmıştır. Zaman içinde anaerobik arıtma, diğer tarım atıklarının, atık suyun ve endüstriyel organik atıkların bertarafında kullanılmış, en sonunda ise kentsel katı atıkların bertarafında kullanılmaya başlanmıştır. Anaerobik arıtmanın kullanımı sürekli bir artış

göstermemiş; özellikle kömür ve petrol fiyatlarının düştüğü dönemde metan gazı üretiminin tercih edilir olmadığı görülmektedir. II. Dünya savaşı ile Avrupa’da yaşanan petrol kriziyle anaerobik arıtma uygulamalarında artış görülmüş fakat II. Dünya savaşından sonra fosil atıklı yakıtların fiyatlarındaki azalma ile birlikte kullanımı azalmıştır.

Gelişmiş dünya ülkeleri anaerobik arıtma uygulamalarını atık su çamuru bertarafı dışındaki alanlarda kullanmayı çok sıklıkla tercih etmemişlerdir. Ancak Çin ve Hindistan gibi gelişmekte olan ülkeler anaerobik arıtmayı gelişmiş ülkelere kıyasla çok daha fazla kullanmışlardır. Bu ülkelerde anaerobik arıtma sistemleri, enerji üretimi ve atıkların bertarafı yardımıyla çevre kirliliğini önlemek ve halk sağlığını korumak için kurulmuş ve kurulan sistemlerin çoğu küçük ölçekli sistemler olmuştur. Bu tip sistemlerin uygulamaları zaman içinde kademeli olarak artmıştır. Gelişmiş ülkelerde endüstriyelleşme ve şehirleşme, elektrik fiyatlarının düşüklüğü ile artış göstermiştir. Hızlı endüstriyelleşmenin ve şehirleşmenin sonucu olarak atık yönetiminde aerobik gübrelendirme ve çöp sahası doldurma daha kolay ve az maliyetli olduğu için, anaerobik arıtmanın yerine tercih edilmiştir. Başka bir ifadeyle, anaerobik arıtmanın uygulama alanının genişlemesine engel olmuştur.

15 Ekim 1973 yılında Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC) tarafından batılı ülkelere getirilen petrol ambargosu ile sonuçlanan enerji krizi, özellikle Amerika’yı alternatif enerji stratejileri konusunda araştırma yapmaya zorlamıştır. Bu çalışmalar sonucunda 1970 yılında Amerika’da ilk çiftlik çürütücüsü kurulmuş, bu çiftlikte üretilen biyogaz ısınma ve güç üretimi için kullanılmıştır. Benzer bir kriz 1979 yılında tekrarlanmış ve metan gazı üreten basit anaerobik sistemlere olan ilgiyi daha da arttırmıştır. Bu kriz sebebiyle Hindistan, Çin ve Güneydoğu Asya’da anaerobik arıtma alanında belirgin bir büyüme görülmüştür. Bu anaerobik sistemler, çoğunlukla substrat olarak insan, hayvan ve mutfak atıklarının kombinasyonlarını kullanmışlardır. Zamanla Avrupa, Kuzey Amerika ve Sovyet Rusya hayvan gübresinden metan üretme çalışmalarına dâhil olmuştur. Amerika Birleşik Devletleri çalışmalara, biokütlenin anaerobik arıtımıyla enerji üretimine ağırlık veren ulusal yenilenebilir enerji programını yayınlayarak büyük katkıda bulunmuştur.

Anaerobik arıtmanın hızlı gelişim sürecinde birçok proje finansal olarak desteklenmiştir. Desteklenen projeler yüksek oranda başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Gerçekleştirilmeye çalışılan projelerin başarısızlık oranı Çin, Hindistan ve Tayland’ da %50 olduğu görülmektedir. Amerika’daki çiftlik çürütücüsü projelerindeki başarısızlık dramatik bir şekilde %80’lere ulaşmıştır. Benzer başarısızlıklar Rusya’da da yaşanmıştır[2]. Yaşanan

başarısızlıklar anaerobik arıtmanın yaygınlaşmasına engel olan diğer bir faktör olarak gösterilebilir.

Çin ve Hindistan elektrik üretebilmek için daha büyük ölçekli, süreçlerin daha iyi kontrol edildiği anaerobik arıtma sistemleri kurarak yeni bir akım başlatmıştır. Zamanla anaerobik arıtma sistemleri daha karmaşık bir yapıya bürünmüş ve alışlagelmişin dışındaki substrat tipleri, bu sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Avrupa' da ise devlet destekli pilot projelerle anaerobik arıtmanın yaygınlaşması ve sistem performansının iyileştirilmesi 30 yıllık bir süreçte gerçekleştirilmiştir. Avrupa'daki bu gelişim süreci çöp alanlarına boşaltılan atıklardan yüksek ücret alınmasıyla, katı çevreci düzenlemelerle, yenilenebilir enerji yasalarıyla, çöp alanı kısıtlamalarıyla ve vergi teşvikleriyle desteklenmiştir.

2.2. Anaerobik Arıtma

Anaerobik arıtma, biyolojik olarak parçalanıp bozunabilen organik maddelerin oksijensiz ortamda, anaerobik bakteriler tarafından parçalanarak CO₂, CH₄ ve NH₃ gibi son ürünlere dönüşmesidir. Anaerobik arıtma bir dizi reaksiyonun, birbirleriyle etkileşimli bakteriler tarafından gerçekleşmesiyle olur. Bu arıtma süreci dört aşamadan oluşmaktadır: 1. Hidroliz aşaması, 2. Asit oluşumu aşaması, 3. Asetat oluşumu aşaması ve 4. Metan oluşumu aşaması. Bu dört aşama da farklı mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilir. Bu süreçte gerçekleşen reaksiyonlarda ürün girdi ilişkisi vardır; başka bir ifadeyle, bir tepkimenin nihai ürünü diğer tepkimenin girdisidir. Hidroliz aşamasında büyük molekülü organik maddeler küçük molekülü organik maddelere dönüştürülür; örneğin, karmaşık organik maddelerin amino asitlere, yağ asitlerine ve monosakkaritlere dönüşmesi gibi. Bu monomer yapıdaki organik maddeler, asit oluşum aşamasındaki bakteriler tarafından basit organik asitlere ve ketonlara dönüşür. Asetat oluşum aşamasında ise bakteriler tarafından karbohidratlar üzerinden asetat oluşumu gerçekleşir. Son olarak metan oluşum bakterileri tarafından H₂, CO₂ ve asetat CH₄'e dönüştürülür. Bu aşamalar ayrı başlıklar altında detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.

2.2.1. Hidroliz Aşaması

Anaerobik arıtmanın başlangıç adımı olan bu aşamada suda çözünemeyen karmaşık organik maddeler kendi bileşenlerine ayrılarak, çözünebilen moleküllere çevrilmektedir; örneğin proteinler amino asitlere, yağlar yağ asitleri, gliserol ve trigliseridlere karışık yapıdaki karbohidratlar polisakkaritler, selüloz, lignin, nişasta ve lifler glikoz gibi basit şekerlere ayrılmaktadır. Hidroliz aşaması mikroorganizmalar tarafından salgılanan enzimler sayesinde

hücre dışında gerçekleşmektedir. Bu enzimlerden bazıları şunlardır; lipases, proteases, cellulases, amylases ve benzeri. Hücre dışı enzimler tarafından gerçekleştirilen bu safhanın hızını, enzimlerin çalışma koşullarını etkileyen faktörler belirlemektedir. Hidroliz aşamasının hızını etkileyen faktörler; Ortam sıcaklığı, pH' ı ve en kritik etmen olarak hidrolik bekleme süresidir. Hidrolik bekleme süresi yeteri kadar uzun olmazsa, organik madde en uygun ölçüde hidrolize olamaz. Bu sebeple anaerobik arıtma sürecinin bir sonraki asetat oluşum aşamasında, bakterinin uçucu yağ asitlerine dönüştürülmesi için ihtiyaç duyulan basit yapıları organik maddeler yeterli düzeyde sağlanamaz. Bu durum ise zincirleme bir etki yaratarak, sürecin performansını düşürmekte; daha az organik miktar arıtıma sebep olabilmektedir. Bunun yanında, anaerobik arıtma sürecini sınırlayan faktörler bütünüyle düşünüldüğünde, hidroliz basamağının kendi başına sınırlayıcı bir etmen olduğu söylenemeyebilir. Ancak, çok yavaş hidrolize olan organik maddelerin anaerobik arıtma işlemlerinde, hidroliz aşaması kendi başına sınırlayıcı bir etmen olabilir. Buna örnek olarak yağların yavaş hidroliz olması verilebilir. Hidroliz aşamasında gerçekleşen reaksiyonlar Şekil 6' da ve hidroliz safhasında gerçekleşen tepkime ise Eşitlik 2.1'de verilmektedir.

Tablo 1. Hidroliz reaksiyonunun girdileri ve çıktıları

Hidrolize olan maddeler	Lipitler	Polisakaritler	Proteinler	Nükleik asitler
Hidrolize işleminin ürünleri	Yağ asitleri	Manosakaritler	Amino Asitler	Pürinler ve Pirimidinler



2.2.2. Asit Oluşumu

Asit oluşum aşamasında ise asit oluşturuçu bakteriler olarak da bilinen asit oluşum bakterileri hidroliz aşamasındaki son ürünleri basit organik asitlere, çoğunlukla kısa zincir uçucu asitlere (örnek olarak; propiyonik, formik, laktik, bütirik veya süksinik), ketonlara (örnek olarak; etanol, metanol, gliserin) ve alkollere dönüştürmektedir. Bu aşamada ürün konsantrasyonları ortam koşullarına göre değişmektedir. Sıcaklık ve ortam pH'ı, tepkimelerin ürün miktarlarını etkileyen etmenlerdendir. Asit oluşum aşamasında gerçekleşen tipik iki reaksiyon aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.





Eşitlik 2.2 glikozun etanole; Eşitlik 2.3 ise glikozun propiyonata çevrildiğini göstermektedir.

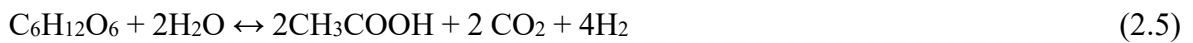
2.2.3. Asetat Oluşumu

Asetat oluşum aşamasında, asit oluşum aşamasındaki bakteriler tarafından üretilen ürünlerden kalan ürünler örneğin propiyonik asit, bütirik asit ve alkoller, asetat oluşum bakterileri tarafından hidrojene, karbondioksit ve asetik asite dönüştürülmektedir. Bu safhadan geçen ürünlerin biyolojik oksijen ihtiyaçları ve kimyasal oksijen ihtiyaçları indirgenmektedir. Anaerobik arıtma tepkimelerinde hidrojen aracı olarak çok önemli rol oynamaktadır. Lipitlerin hidrolizinden oluşan uzun zincir yağ asitleri asetata ya da propiyonata oksitlenmekte ve hidrojen gazı oluşmaktadır. Normal koşullarda, çözeltideki hidrojen varlığı oksitlenmeyi engellemektedir. Asetat oluşum reaksiyonu yalnızca hidrojenin kısmi basıncı, termodinamik olarak tepkimenin gerçekleşmesini sağlayacak kadar düşük olduğunda meydana gelmektedir. Hidrojenin varlığında, hidrojen süpürme bakterileri tarafından hidrojen tüketilmekte ve böylece hidrojenin kısmi basıncını azaltılmaktadır. Hidrojen süpürme bakterileri, termodinamik olarak uygunluğu sağlanması ve asitlerin hepsinin dönüşümü için gereklidir. Başka bir ifadeyle kısmi basınçla ölçülen hidrojen konsantrasyonu, çürütücünün fonksiyonunu gerçekleştirdiğini gösteren bir indikatördür[3].

Tepkimenin hidrojen nedeniyle termodinamik olarak gerçekleşmeme durumuna, eşitlik 2.4 deki tepkime örnek olarak verilebilir. Bu tepkimedeki serbest enerji miktarı +76.1 KJ' dir ve bu da tepkimenin gerçekleşmesini termodinamik olarak elverişsiz kılmaktadır. Ancak asetat ve hidrojen, bakteriler tarafından tüketildiğinde, serbest enerji negatif değere inmektedir. Genel ifadeyle H₂ üreten tepkimelerde, tepkimenin sürmesi için hidrojenin kısmi basıncının yeteri kadar düşük olması gerekmektedir.



Asetat oluşum aşamasında gerçekleşen diğer önemli tepkimeler sırasıyla glikozun, etanol ve bikarbonatın dönüşümüdür. Söz konusu tepkimeler aşağıda verilmektedir.



Yukarıda verilen tepkimelerde, organik maddelerin organik asitlere dönüşümü sistemin pH düzeyinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum asit oluşum bakterileri açısından faydalı

bir durumdur çünkü asit bakterilerinin büyük bir bölümü pH düzeyi 4.5-5.5 arasında olan ortamlarda yaşamayı sürdürebilmektedir. Bu asit düzeyi asit oluşum bakterileri tarafından tercih edilebilir ortam olmasına rağmen, sistemde bir sonraki aşamada faaliyet gösterecek olan metan oluşum bakterileri için sorunlu bir durum yaratmaktadır[4].

2.2.4. Metan Oluşumu

Son aşama olan metan oluşum aşamasında ise metan bakterileri tarafından, asit oluşum ve asetat oluşum bakterilerinin ürünleri, metan gazına, suya ve karbondioksite çevrilmektedir. Bu bakteriler, denizlerin veya okyanusların diplerindeki tortularda doğal olarak gelişen ve otçul geviş getiren hayvanların işkembelerindeki bakterilerle aynı özelliği taşımaktadır. Bu popülasyona ait bakteriler suda çözünebilir maddeleri metana çevirmekte; bu çözünebilir maddelerin büyük bir bölümü (2/3'ü) asetat dönüşümünden meydana gelmektedir. Çözünür maddeleri metana çeviren bakterilerin, asetatı metan gazına çevirme tepkimeleri eşitlik 2.8 ve 2.9' da verilmektedir. Bununla birlikte, bu popülasyona ait bakterilerin alkol fermantasyonu ile metan gazı üretme tepkimesi eşitlik 2.10'da gösterilmektedir. Eşitlik 2.8, 2.9 ve 2.10'da gösterilen eşitliklerde, bakteriler sayesinde üretilen metan gazı toplam üretimin üçte ikisini oluşturmaktadır. Metan gazının kalan üçte birlik üretimini oluşturan, hidrojen sayesinde karbondioksit indirgenmesi tepkimesi ise eşitlik 2.11' de verilmektedir.



Metan üretim bakterileri ortamın pH düzeyindeki değişikliklere karşı çok hassastır ve bakteriler tercihen alkali ortamlarda canlılık göstermektedirler[4]. pH düzeyi 6'nın aşağısında olduğunda ise bakteriler hayatta kalamazlar. Metan üretim safhasında bakterilerin gelişme hızı ise tüm sistemin hızını belirleyici niteliktedir[5].

Özet olarak tüm anaerobik sistem düşünüldüğünde, tepkimeler arasında girdi çıktı ilişkisi olmasına ve sistemin dört ayrı aşamada ifade edilmesine rağmen tüm aşamalar eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir.

Takip eden bölümde anaerobik arıtma koşullarına yer verilmekte ve daha sonra bu çalışmada kullanılan anaerobik arıtma modeli açıklanmaktadır.

2.3. Anaerobik Arıtma Koşulları

Anaerobik arıtma sürecindeki bakterilerin faaliyet gösterebilmesi için belirli ortam koşullarının sağlanması gerekmektedir. Ortam ve anaerobik arıtıcının çalışma parametrelerindeki herhangi bir değişiklik farklı tür ve özelliklere sahip bakteriler arasındaki dengeyi bozmakta, bu bozulma da tüm süreci olumsuz etkilemektedir. Anaerobik arıtma sistemlerinde dengenin sağlanması ve sürdürülebilir olması; ayrıca bu dengeyi etkileyen parametrelerin izlenmesi ve sürekli kontrol altında olması, sistemin performansı için kritik önem taşımaktadır. Buradan yola çıkarak, bu bölümde denge mekanizmasını etkileyen pH, sıcaklık karbon azot oranı(C/N), bekleme süresi ve organik yükleme oranı parametrelerinin etkisi detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

2.3.1. pH

Anaerobik arıtma sisteminin sağlıklı çalıştığını gösteren en önemli ölçüt pH dengesidir. Sistemdeki pH değeri biyolojik reaksiyonlar nedeniyle sürekli değişmektedir. Anaerobik sistemlerde biyogaz üretim miktarındaki düşüş, sistemin asit düzeyindeki dengesizliği ifade eden en hızlı göstergedir. Anaerobik sistemler için kabul edilebilir pH seviyesi 5.5-8.5'tir. Optimal seviye nötr düzeyine yakındır. Liu vd. (2008) en uygun pH düzeyinin mezofilik koşullarda 7.10, termofilik koşullarda 7.21 olduğunu belirtmektedir[6]. Kabul edilebilir pH düzeyinden uzaklaşıldığı durumda, metan oluşum bakterileri inhibe olmaktadır.

Reaktör içindeki uçucu katı madde miktarının sistemin pH düzeyi üzerinde önemli bir rolü bulunmaktadır. Reaktör içinde fazla uçucu katı madde yüklenmesi durumunda, asit toplanması gerçekleşecektir. Bu asit birikmesi asit oluşum bakterilerinin sayısının artmasına sebep olmakta ve sistemin pH'ında azalma ile sonuçlanmaktadır. Eğer sistemde asit oluşum bakterilerinin sayısı kontrol altına alınmaz ise sistemin pH'ı 5.0 altına kadar düşmektedir. Bu düşük pH seviyesi metan oluşum bakterileri için ölümcül düzeydir. Anaerobik arıtma sistemlerinde pH düzeyinin kararlılığı için uçucu katı madde yükleme miktarı kontrol altında tutulmalıdır.

Anaerobik arıtma sistemlerinde pH düzeyine etkileyen diğer bir faktör sistemin nem oranıdır. Nem oranındaki artış sistemin pH düzeyini yükseltmekte, nem oranındaki azalma ise sistemin pH düzeyini düşürmektedir. Sistem en uygun pH düzeyindeyken, nem oranında %96'dan %90'a gerçekleşen %6'luk bir düşüş, sistemdeki metan oluşum bakterilerinin sayısında %47'lik bir azalmaya neden olmaktadır[7]. Metan üretim bakterilerinde oluşan bu

düşüş doğrudan biyogaz üretimini azaltmaktadır. Nem oranının anaerobik sistemlerde pH düzeyi üzerindeki bu önemli rolü göz önüne alınarak kontrol altında tutulmalıdır.

Bununla birlikte, anaerobik arıtma sisteminde pH düzeyini etkileyen diğer bir faktör biyolojik reaksiyonlar sonucunda reaktör içinde açığa çıkan amonyaktır. Bilindiği üzere, reaktörde açığa çıkan amonyak, metan oluşum bakterilerinin faaliyetinden kaynaklanmaktadır. Amonyak miktarı arttığında, sistemin alkaliliği artmakta; pH düzeyi 8.0'a ulaştığında ise asit oluşum bakterileri işlevlerini gerçekleştirmez hale gelmektedir. Asit oluşum bakterilerinin faaliyet gösteremediği durumda, metan oluşum bakterilerinin biyogaz üretmek için ihtiyaç duydukları asitler oluşmamakta ve biyogaz üretimi gerçekleşmemektedir.

2.3.2. Sıcaklık

Anaerobik arıtma sistemlerinde, mikroorganizmaların faaliyeti üzerinde etkili olan önemli faktörlerden biri de sıcaklıktır. Anaerobik organizmalar -20 °C - 106 °C derece olan bir sıcaklık aralığında faaliyet gösterebilmektedirler. Bu sıcaklık aralığında 3 çeşit mikroorganizma türü faaliyet gösterebilmektedir. Bunlar sırasıyla; psikrofil, mezofilik ve termofilik mikroorganizmalarıdır. Psikrofil mikroorganizmalar -20 °C - 10 °C derece arasında, mezofilik mikroorganizmalar 20 °C - 45 °C derece arasında ve termofilik bakteriler ise 41 °C - 122 °C derece arasında aktiftirler. Morita vd. (1975) psikrofil mikroorganizmalarının gelişimi için en uygun sıcaklığın 15 °C derece olduğu ifade etmektedirler[8]. Chae vd., (2008) domuz gübresinden 25°, 30° ve 35 °C derecelerdeki mezofilik sıcaklık koşullarında anaerobik süreç yardımıyla biyogaz üretim miktarını izlemiş, 25 °C en düşük biyogaz üretimi alındığını tespit etmişlerdir[9]. Bunun yanında, 30 °C-35 °C derecedeki sıcaklıklarda biyogaz üretim miktarının benzer olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Buradan yola çıkarak, mezofilik sıcaklık değerinin 30°C-35°C derece arasında seçilmesinin, anaerobik sistemdeki mikroorganizmaların etkin bir şekilde faaliyet gösterebilmesi için uygun olduğu anlaşılmaktadır. Termofilik işletme koşullarında ise sıcaklık genellikle 50°C-65°C arasında seçilmektedir.

Her işletme koşulunun kendisine has avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan biri, termofilik koşullarda sisteme mezofilik koşullara kıyasla daha fazla organik madde yüklemesinin yapılabilmesi olmasıdır. Bundan dolayı, bu koşullarda substrat daha hızlı bozulabilmektedir. Ancak termofilik ortamda faaliyet gösteren mikroorganizmalar sıcaklık değişikliklerine karşı daha fazla hassasiyet göstermektedirler. Bu da termofilik sistemlerin

bir dezavantajı olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, termofilik sistem yüksek sıcaklıkta çalıştırıldığı için mezofilik ortama göre daha fazla enerji ihtiyacı duymaktadır. Mezofilik ortamda ise faaliyet gösteren mikroorganizmalar ortam koşullarındaki sıcaklık değişimlerine daha fazla dayanıklılık göstermekte ve sistemdeki ani sıcaklık değişimlerine daha hızlı adapte olabilmektedirler. Örneğin Chae vd., (2008) çalışmalarında, ortam sıcaklığının 30 °C'den 32°C'ye aniden yükseltilmesiyle, biyogaz üretimindeki düşüş meydana geldiğini ancak mikroorganizmaların süratli adaptasyonu sayesinde biyogaz üretim miktarının hızlıca önceki değerine çıktığını tespit etmişlerdir.

2.3.3. Karbon/Azot (C/A) Oranı

Yukarıdaki faktörlere ek olarak, anaerobik sistemlerdeki biyogaz üretimini etkileyen diğer bir faktör C/A oranıdır. Kullanılan substratın organik madde içeriği, C/A oranını belirlemekte ve bu oran anaerobik sistemlerin performansı için etkilemektedir. Örneğin; mısır silajı yüksek miktarda karbon içerdiğinden C/A oranı bu madde için yüksektir, et atıklarının ise azot içeriği yüksek bu nedenle C/A oranı düşüktür. Anaerobik sistemlerde düşük C/A oranı reaktörde amonyak birikmesine sebep olarak sistem pH'ının 8.5 ve üzerine çıkmasına sebep olmaktadır. Yüksek pH seviyesinde ise asit oluşum bakterileri inhibe olmaktadır. Benzer şekilde yüksek C/A oranı, metan oluşum bakterilerinin azotu hızlıca tüketmesine neden olarak biyogaz üretimini düşürmektedir. Anaerobik sistemler için en uygun C/A oranının 25 olduğu; ancak 20-30 arasındaki değerlerin ise kabul edilebilir düzeyde olduğu vurgulanmaktadır.

2.3.4. Bekletme Süresi

Hammaddenin reaktörde kaldığı toplam süreye bekletme süresi denir. Anaerobik sistemlerde iki önemli bekletme süresi vardır. Bunlar sırasıyla; çamur bekletme süresi (ÇBS) ve hidrolik bekletme süresidir (HBS). Çamur bekletme süresi, çamurun anaerobik sisteme giriş yaptığı zamandan çıkış yaptığı zamana kadar geçen süreyi ifade etmektedir. Benzer şekilde hidrolik bekletme süresi atık suyun anaerobik sisteme giriş yaptığı zamandan çıkış yaptığı zamana kadar geçen süredir. Katı çamurun tekrar işleme sokulmadığı askıda büyüyen anaerobik sistemler için ÇBS ve HBS aynıdır. Ancak, eğer çürütücüde katı çamur tekrar anaerobik çevrime sokuluyorsa, ÇBS ve HBS arasında önemli bir fark oluşmaktadır. Her iki bekletme süresinin de sistem performansını etkilediği görülmektedir.

Günümüzde çoğu anaerobik sistem askıda büyüyen türden olduğu için ÇBS ile HBS eşittir. İhtiyaç duyulan bekletme süresi atıksu karakteristiğine ve sıcaklığa bağlı olarak

değişmektedir. Eğer bekletme süresi için, ihtiyaç duyulandan daha az bir süre ayrılırsa; organik madde içeriği yeteri kadar hidrolize olamadığından metan oluşum bakterileri faaliyet gösterememekte ve sonuç olarak reaktör asitlenmektedir[10].

Mevcut anaerobik sistemlerin çoğu mezofilik koşullarda işletilmekte ve bu sistemlerdeki bekletme süresi ortalama 15-20 gün olduğu görülmektedir. Mezofilik koşullardaki bekletme süresi termofilik koşullardakine kıyasla daha uzundur. Ancak mezofilik sıcaklıkta daha küçük hacimli reaktörlere ihtiyaç duyulduğundan, yatırım maliyeti düşük olmaktadır. Maliyet avantajı, mezofilik sıcaklıkta işletilen anaerobik sistemlerin tercih edilmesine neden olmaktadır.

Termofilik sıcaklıkta ise bekletme süresi 2-4 gün arasında olmaktadır. Genellikle bu sistemler organik madde yükleme miktarının fazla ve organik madde yükleme hızının yüksek olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Ancak termofilik sıcaklıktaki düşük bekletme sürelerine ulaşabilmek için büyük hacimli reaktörlerin kullanılması gerektiğinden, yatırım maliyeti yükselmektedir. Bu yüzden söz konusu anaerobik arıtma sistemleri nadiren tercih edilmektedir.

2.3.5. Organik Yükleme Hızı (OYH)

Organik yükleme süresi de anaerobik sistemlerin önemli parametrelerinden biridir. Çürütücüye giren uçucu katı madde miktarı OYH ile belirlenmektedir. OYH biyogaz üretim miktarı üzerinde etkili bir role sahiptir. Bunun yanında, en uygun OYH substrat çeşidine, çürütücü tipine ve çürütücü çalıştırma koşullarına göre her sistem için farklılık göstermektedir. Yüksek OYH için reaktör içinde daha fazla mikroorganizmaya ihtiyaç duymakta ve eğer yeteri kadar mikroorganizma yok ise problem ortaya çıkmaktadır. Yüksek OYH' de asit oluşum bakterilerinin gelişimi için yeterli substrat bulunmakta ve asit oluşum bakterileri metan oluşum bakterilerinden daha önce ortaya çıkmakta ve gelişmektedirler. Reaktör içinde sayıları artan asit oluşum bakterileri, reaktör ortamının pH düzeyini düşürmektedir. Düşük pH düzeyinde metan oluşum bakterilerinin performansı düşmekte, hatta 5.5 pH düzeyinin aşağısında metan oluşum bakterilerinin tamamı inhibe olmaktadır[11].

Babae vd.' nin (2011) çalışmalarında 70 litre hacminde yarı sürekli pilot reaktöre 3 farklı OYH' deki sebze atıklarından meydana gelen organik madde yüklemesi yapılmaktadır. OYH' leri sırasıyla; 1.4, 2 ve 2.75 UKM/m³.g' dir. En yüksek biyogaz üretimi ve biyogazın metan içeriği yüzdesi 1.4 UKM/m³ yüklemesi için elde edilmektedir. Reaktörde yüksek

OYH' lerde açığa çıkan biyogaz miktarının azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla, OYH' nin anaerobik sistemlerin performansını belirleyici bir rol oynadığı ve kontrol altında tutulması gerektiği görülmektedir.

2.3.6. Karıştırma

Anaerobik sistem performansını iyileştiren önemli uygulamalardan biri de reaktör atığının mekanik karıştırıcı ile karıştırılmasıdır. Reaktör içine yüklenen taze maddenin, mikroorganizmaları üzerinde barındıran ve sindirilmiş halde olan madde ile harmanlanması, karıştırıcı ile sağlanmaktadır. Ağır ve lifli maddelerin anaerobik sistemlerde kullanılmaya başlanmasıyla, reaktör içindeki katı madde toplanmasını önlemek için, birçok uygulamada karıştırıcı kullanılmaktadır. Buna ek olarak, karıştırıcı reaktör içerisindeki katı maddenin dengeli olarak dağıtılmasını, ayrıca katı maddenin mekanik ve biyolojik olarak homojene yakın olarak bozulmasını sağlamaktadır. Wang vd.' lerinin çalışmasında yemek atıkları anaerobik çürütücü içinde, sırasıyla dakikada 20, 60, 100 ve 140 kez karıştırılmış ve 1 gram UKM başına metan üretimi incelenmiştir. En yüksek değer dakikada 140 kez karıştırma ile elde edilmiştir [39].

2.4. Anaerobik Arıtma Modeli' nin (ADM1) Tarihsel Gelişimi

ADM1'in geliştirilmesi, 1983 yılında "International Association on Water Quality (IAWQ)" çalışma grubunun ortaya koyduğu "Activated Sludge Model No.1 (ASM1)" modeline dayanmaktadır. ASM1 modeli 4 yıllık bir çalışmanın ardından 1987 yılında tanıtılmıştır. Bu modelin ilk sürümünde, 1983 yılına kadar kurulan modeller incelenerek, tek tip katı çamur kullanan arıtma sistemlerinin karbon oksidyonunu, nitratlaşmasını ve nitrat gidermesini gerçekçi olarak tahmin etmek amaçlanmıştır. Model zaman içinde geliştirilmiş ve filamentöz bakterilerinin reaktör içinde toplanmasını ifade eden dinamik denklem modele eklenmiştir. Ayrıca, modele fosfor giderimi tahmini yapabilme yeteneği kazandırılmış ve fosforun kimyasal çökeltme modellenmesine imkân verebilecek kimyasal iki süreç eklenmiştir. Bu gelişim süreci daha fazla yeteneğe sahip olan "Activated Sludge Model No.2 (ASM2)" modelinin yaratılmasına olanak sağlamıştır.

1995 yılında yayınlanan ASM2 modeli ise, ASM1 modelinin kapsam olarak genişletilmiş halidir. ASM2 modeli, ASM1 modeline göre daha karmaşık yapıda olup atık suyu daha iyi karakterize etmek için daha fazla bileşen içermektedir. Bu değişikliğe ek olarak, ASM1 modelinde ihmal edilen ve model parametrelerine dâhil edilmeyen biokütlenin hücre içyapısı, ASM2 modeline dâhil edilmiş ve bu sayede biyolojik fosfor giderimi tahmini

iyileştirilmiştir. ASM2 modeli, zaman içerisinde ufak değişiklikler yapılarak model “Activated Sludge Model No.2d (ASM2d)” modeline yükseltilmiştir. ASM2d versiyonunda fosfor biriktiren organizmaların hücre içi organik depolama ürünlerinin, nitrat giderimi için kullanılabilirdiğini göstermek için iki ek süreç ASM2 modeline eklenmiştir. Bununla birlikte fosforun kimyasal toplanmasını modelleyebilmek için iki ek kimyasal süreç eşitliği de modele dâhil edilmiştir[12].

ASM1 modelinin çıkışından sonra geçen on yıllık süreçte bu modelin uygulamalarında çeşitli aksaklıklar ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Bu yüzden 1999 yılında ASM1 modelinin eksiklerini gidermek için “Anaerobic Sludge Model 3(ASM3)” yayınlanmıştır. Gujer vd.’nin (1999) çalışmalarında bahsedilen söz konusu eksikliklere ilerleyen kısımda değinilmektedir[13]. ASM3 modeline, ASM1’de bulunmayan heterotrof organizmalarının azot ve alkalilik sınırlarını ifade eden kinetik eşitlikler eklenmiştir. Bu sayede modelde amonyak konsantrasyonunun negatif sonuç vermesi engellenmiştir. ASM1’de biyolojik olarak çözülebilir ve parçacık haldeki organik azot modelin bir bileşeni olarak ifade edilmektedir. Ancak gerçekte bu bileşenin deneysel olarak ölçülmesi çok zordur. Bu yüzden bu bileşen ASM3’de çıkarılmıştır. Bununla birlikte ASM1’de amonyaklaşma hızının miktarı belirlenememekteydi. ASM3 modelinde ise amonyaklaşma hızı sabit katsayıyla ifade edilerek tanımlanmıştır. Anaerobik koşullarda incelenen, polihidroksialkonatların ve glikojen birikmesinin aktif çamur santrallerinde biyolojik olarak çözünebilen substrat konsantrasyonunu yükselttiği görülmüştür. Bu artış ASM1’de tanımlanmamıştır. Bunlara ek olarak ASM1’de nitratlaşma oranlarının tahmininin iyi yapılamadığı anlaşılmıştır. Bütün bu eksikliklerin giderilmesi için ASM3 yayınlanmıştır.

2002 yılında yayınlanan ADM1 modeli ise kendinden önceki ASM1, ASM2, ASM2d ve ASM3 modellerinde üretilen bilgi birimi ve deneyim sayesinde ortaya çıkmıştır. ADM1 modeli gerçek ölçekli atık arıtım santrallerinin modellenmesini yapmak için meydana getirilmiştir. Kendinden önce gelen modellerde odak noktası biyogaz üretimi olmamasına rağmen ADM1’de odak biyogaz üretimi tahmini yapmaktır. Şimdiye kadar ileri sürülen modellerin arasında en etkili sonuç veren model olan ADM1 çıktığı günden itibaren sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yüzden ADM1 modelini temel alan anaerobik sistemlerde modelleme yapan birçok bilgisayar programı üretilmiştir. Bu programlara örnek olarak Biowin, Simba ve Biosim verilebilir.

2.5. Anaerobik Arıtma Modelleme Yaklaşımının Avantajları

Anaerobik arıtma sistemleri birbirlerinden etkilenen birçok parametre ve bileşenden oluşmaktadır. Bu parametre ve bileşenlerin, anaerobik arıtma sistemi yatırımı yapacak olan işletmenin koşullarına uygun olarak seçilmesi önemlidir. Modelleme ise işletmelere bu konuda yardımcı olmaktadır.

Modellemenin sağladığı avantajlardan biri işletmeye anaerobik arıtma sisteminin çıktıları ile ilgili önceden bilgi sağlamasıdır. Bu yönüyle modelleme yapan işletmeler, sistem kurulmadan önce sistemin performansı hakkında bilgi sahibi oldukları için, yatırımdan elde edecekleri getiriyi de önceden tahmin edebilirler. Bu da işletmelerin, anaerobik arıtma sistemi yatırımlarını finansal açıdan etkili bir şekilde planlanmalarına yardımcı olmaktadır.

Modellemenin sağladığı diğer bir avantaj, anaerobik arıtma sisteminin hangi parametre ve bileşenler ile kapasitesinin ne kadar olabileceği hakkında işletmelere güvenilir veri sağlamasıdır. İşletmeler modelleme yaparak en uygun kapasite için hangi parametre ve bileşenlerin ne düzeyde kullanılması gerektiğini görebilir ve buna uygun bir maliyet analizi yapabilir. Ayrıca bu şekilde atıl ya da düşük kapasite sorunlarının önüne geçilerek işletmenin kısa ve uzun dönem karlılık oranları kontrol altına alınabilir

3. ANAEROBİK ARITMA MODELİ NO:1 (ADM1)

Bu çalışmada kullanılan ADM1, biyogaz üretim santrallerinin benzetiminde çok sıklıkla yararlanılan matematiksel bir modeldir. Bu model “IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes” tarafından geliştirilmiş ve zaman içinde farklı çalışma grupları tarafından model üzerinde birçok bakımdan iyileştirilmeye gidilmiştir [14]. Model ilk olarak yalnızca kanalizasyon çamurundan biyogaz üreten santrallerde kullanılmış; ancak zaman içerisinde model farklı atık maddeler ve biokütleler için adapte edilmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

Model temel olarak 35 dinamik süreçten ve 200 adet denge eşitliğinden oluşmaktadır ve modelde mikroorganizmaların büyüme hızı Monod-tip seviyesinde gerçekleşmektedir. Modellemesi yapılan reaktör tipi, sabit hacimli sürekli akımlı tam karışımıdır. Bununla birlikte, modellemesi yapılan reaktörde birden çok paralel ve sıralı aşama gerçekleşmektedir. Bu tepkime sistemi iki başlık altında kategorize edilmektedir: 1. Biyokimyasal Tepkimeler, 2. Fizikokimyasal tepkimelerdir. Biyokimyasal tepkimeler hücre içindeki ve dışındaki enzimler tarafından gerçekleştirilmektedir. Reaktör içindeki karışım bu tepkimede, hücre dışında bileşenlerine ayrılmakta ve bu bileşenlerde çözünür olan monomerlerine hidrolize edilmektedir. Çözünür olan maddeler hücre içi organizmalar tarafından yıkıma uğratılmakta ve bu durum biokütle artışı ve sıralı çürüme ile sonuçlanmaktadır. Fizikokimyasal reaksiyonlarda biyolojik reaksiyonlar gerçekleşmemektedir. Modeldeki fizikokimyasal reaksiyonlar iyonların birleşmesi ve ayrılması ve gaz-sıvı geçişi gibi hal değişimi reaksiyonları şeklinde açığa çıkmaktadır[14].

ADM1’de gerçekleşen biyokimyasal ve fizikokimyasal süreçler detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.

3.1. Biyokimyasal Süreçler

Kimyasal oksijen isteği (KOİ) ve substrat arasındaki farkın ortaya konulması bu modelde oldukça önemli bir faktördür. KOİ’nin büyük bir bölümü biyolojik olarak parçalanmayabilir olabilmektedir. Ancak biyogaz üretiminde KOİ’nin parçalanabilir kısmından faydalanılmaktadır. Literatürde biyolojik olarak KOİ’nin parçalanabilir tarafı substrat olarak adlandırılmaktadır[15].

Biyokimyasal süreçler anaerobik sistem içerisinde önemli bir rol oynamakta ancak fizikokimyasal süreçlerin biyokimyasal süreçler üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir.

Fizikokimyasal hallerin (örneğin; pH ve gaz yoğunlaşmaları) biyokimyasal reaksiyonlar üzerindeki etkisi incelenirken mutlaka fizikokimyasal dönüşümler de ele alınmalıdır.

ADM1'i hazırlayan çalışma grubu modeli yapısal olarak ara ürünleri de dikkate alarak inşa etmişlerdir. Bunun nedenlerinden biri bu yapının bir dizi bilimsel ve uygulama temelli avantajlarının olmasıdır. Temel olarak bu avantajlardan biri tüm aşamaların modelin uygulanabilirliğini maksimize etmesi ve diğeri ise modelin aynı zamanda sade ve anlaşılabilir olmasıdır. Model başlıca üç biyolojik (hüresel) adımdan oluşmaktadır. Bu adımlar; 1. Asit oluşumu/fermantasyon, 2. Asetat oluşumu ve 3. Metan oluşumu şeklindedir. Bu süreçlere ek olarak hüresel olmayan ayrışma ve hidroliz süreçleri de modelin önemli basamaklarını oluşturmaktadır (Şekil 1).

ADM1 modelinde, biyokimyasal süreç karışık yapıdaki katı atığın karbonhidrat, protein ve lipide ayrışması ile başlamaktadır. Bu ayrışmanın devamında, karbonhidrat, protein ve lipide ek olarak çözünmez içerik ve çözünür etkisiz madde oluşumu da gözlenmektedir. Hidrolitik sürecinden¹ daha önce gerçekleşen ve bu sürece kıyasla daha basit bir süreç olan biyokimyasal sürecin modele dâhil edilmesinin nedeni etkinleştirilmiş katı çamurun modellenmesini kolaylaştırmasıdır.

Bu süreç ilk olarak Pavlostathis and Gossett (1986) tarafından anaerobik arıtma süreci modellenmesine dâhil edilmiş ve şu şekilde uygulanmıştır: karışık yapıdaki katı atık bir havuzda toplanmış ve bu havuz mikroorganizma hareketleri bakımından aktif olmayan biokütlenin ön yıkım işleminin gerçekleştiği bir kap olarak kullanılmıştır[16]. Böylece, biyokimyasal sürecin ayrışma basamağında lizis süreci, enzimatik olmayan çürüme, evre ayrışması ve fiziksel yıkım gibi bir dizi hücre dışı sürecin içerilebileceği görülmüştür. Bu deneysel çalışma sayesinde, bütün hücre dışı biyokimyasal süreçler basitleştirilerek birinci derece diferansiyel denklemlerle ifade edilmiş ve bu yaklaşım çok aşamalı süreçlerin kümülatif etkisini daha anlaşılır hale getirmiştir.

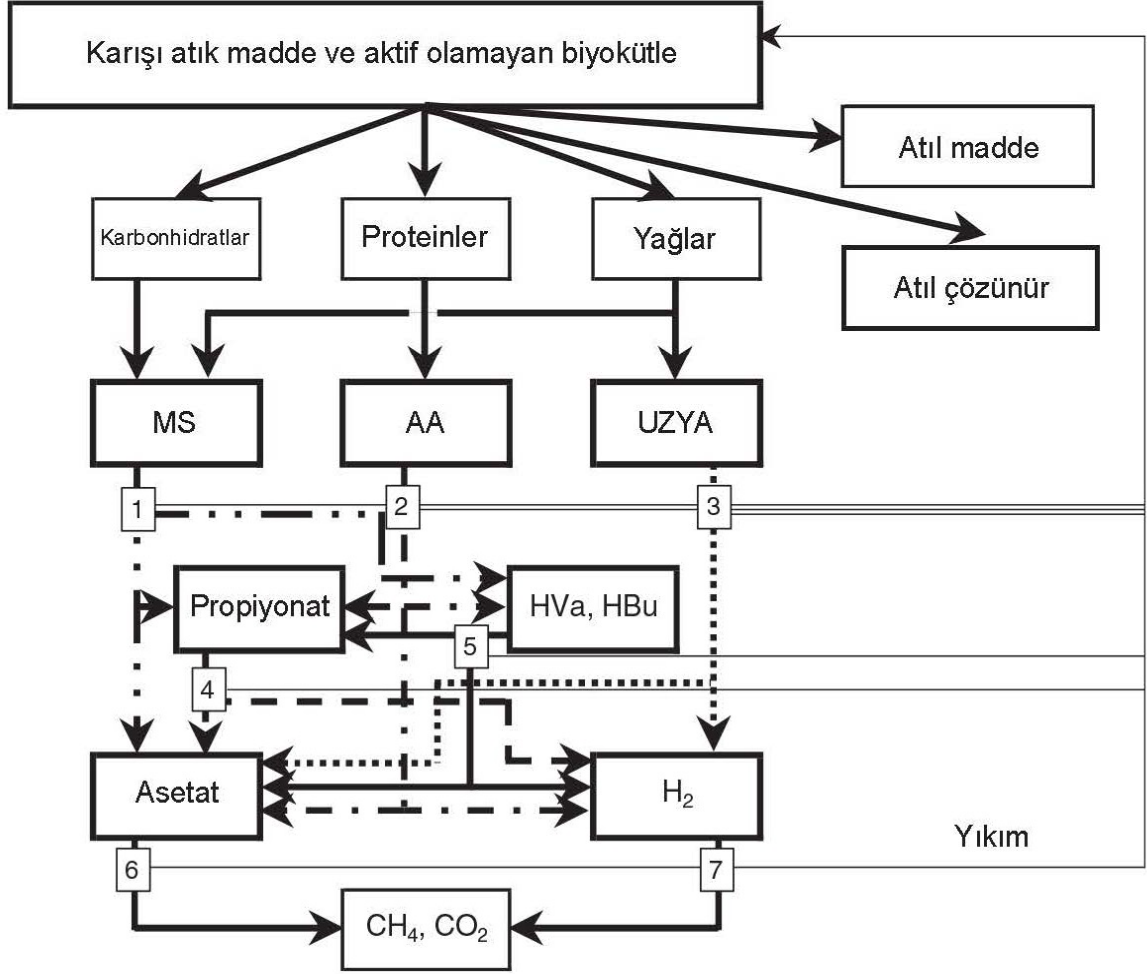
ADM1 modelinde yukarıda bahsedilen çoklu hücre dışı süreçlerin yanında, hücre içi süreçler de gerçekleşmektedir. İki farklı gruba ait asit oluşum mikroorganizmaları monosakkaritleri ve amino asitleri, karma (mixed) organik asitlere, hidrojen ve karbondioksite indirgemekte; daha sonra asetat oluşum mikroorganizmaları organik asitleri asetata, hidrojene ve karbondioksite çevirmektedir. Asetat oluşum mikroorganizmalarının kullandığı organik

¹ Polimerlerin basit yapıları monomerlerine ayrıştığı süreç

asitlere örnek olarak bütirat, valerat ve propiyonat verilebilir. Asetat oluşum mikroorganizmaları tarafından üretilen hidrojeni, metan oluşum mikroorganizmaları; asetati ise asetoklastik mikroorganizmaları kullanmaktadır.

Modelde gerçekleşen bütün hücre içi biyokimyasal reaksiyonlar için substrat alımında monod-tip kinetik fonksiyonu temel alınmaktadır. Biokütle büyümesi ise substrat alımının içinde dolaylı olarak belirtilmektedir. Biokütle yıkımı modelde birinci derece kinetik denklemlerle ifade edilmekte, yıkıma uğramış biokütlenin ise sistemdeki varlığını, karışık ve tanecikli yapıda madde olarak sürdürdüğü belirtilmektedir. Modeldeki mikroorganizmaların inhibisyonuna, pH düzeyi, hidrojen miktarı ve serbest amonyum miktarı sebep olmaktadır. Bu etki, deneysel sonuçlara dayanan pH düzeyi için oluşturulan fonksiyon ile ifade edilmektedir. Serbest amonyumun ve hidrojenin yarattığı inhibisyon etkisi ise nonkompetitif (yarışmasız) fonksiyonla gösterilmektedir. Söz konusu fonksiyonlar modelin matematiksel uygulama kısmına yer almaktadır.

Yukarıda sözü geçen reaksiyonlara ait biyolojik kinetik oran ve katsayıları Ek 1 ve Ek 2’de gösterilen Peterson matrisi formatında verilmektedir. Bu eşitlikler kimyasal oksijen ihtiyacı dengesi gözetilerek oluşturulmuştur. Birçok durumda inorganik karbon (örn: karbondioksit ailesi), katabolizmanın ürünü (örn: şeker alımı, aminoasit, propiyonat, asetat ve hidrojen) için kaynak konumunda olup, bu durumlarda organik karbon oran katsayısı karbon dengesi olarak ifade edilebilir.



Şekil 1. Biyokimyasal süreçleri içeren Oksijensiz çürüme modeli.

(1) şekerlerden asidojenez gerçekleşmesi, (2) amino asitlerden asidojenez gerçekleşmesi, (3) UZYA' den asidojenez gerçekleşmesi, (4) propiyonattan asidojenez gerçekleşmesi, (5) bütirat ve valerattan asidojenez gerçekleşmesi, (6) asetatтан asidojenez gerçekleşmesi, (7) hidrojenден asidojenez gerçekleşmesi

Kaynak: (Batstone v.d. 2002)

3.2. Fizikokimyasal Süreçler

Fizikokimyasal reaksiyonlar mikroorganizmaların eşlik etmediği süreçler olarak tanımlanabilir. Anaerobik çürütücü içinde aşağıdaki şekillerde gerçekleşmektedirler:

1. Sıvı- sıvı geçiş reaksiyonları.
2. Gaz-sıvı hal geçiş reaksiyonları.
3. Sıvı-katı hal geçiş reaksiyonları.

ADM1 modelinde ilk iki maddede belirtilen reaksiyonlar meydana gelmektedir. Sıvı-katı hal geçiş süreci, bu tip arıtma sistemleri için çok önemli olmasına rağmen modele dâhil edilmemesindeki neden reaktör içinde gerçekleşen Mg^{2+} ve Ca^{2+} birikmesi sürecinin matematiksel ifadesinin çok zor ve karışık olmasıdır[14].

Oksijensiz çürüme sistemlerin modellenmesinde fizikokimyasal süreçler önemli bir yere sahiptir çünkü bu süreçler sayesinde pH, serbest asit ve bazlar ve çözünmüş gaz konsantrasyonları gibi bir dizi biyolojik inhibisyon faktörleri matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Sistemin performansını gösteren başlıca değişkenlerden olan gaz akışı ve karbonat alkaliliğini fizikokimyasal süreçler etkilemektedir. Bu yüzden fizikokimyasal süreçler ADM1 modelinin etkili bir biçimde çalışmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bunlara ek olarak, arıtma sistemlerindeki pH denge kontrolü genellikle güçlü asit ve bazlar ile yapılmakta; bu koşulda, kontrol ayar noktası fizikokimyasal durum aracılığıyla hesaplanmaktadır[14].

Anaerobik arıtma sistemlerinde en önemli asit-baz çiftleri şu şekildedir; NH_4^+/NH_3 , CO_2/HCO_3^- , $H_2O/OH^-/H^+$ ve VFA/VFA^- . Matematiksel olarak diferansiyel denklemlere ihtiyaç olmadan cebirsel ifadelerle tanımlanabilir çünkü fizikokimyasal süreçte gerçekleşen ayrışma ve birleşme süreçleri biyokimyasal süreçtekine kıyasla daha hızlı meydana gelmektedir.

Fizikokimyasal sürecin en önemli gaz bileşenleri; CO_2 , CH_4 ve H_2 'dir. Bunlara ek olarak su buharı da bu sürecin önemli bir gaz bileşeni olarak kabul edilmektedir [14]. Fizikokimyasal ve biyokimyasal süreçlerde gerçekleşen tüm reaksiyonları tanımlayan matematiksel eşitlikler takip eden bölümde yer almaktadır.

3.3. ADM NO:1 Modelinin Matematiksel Uygulaması

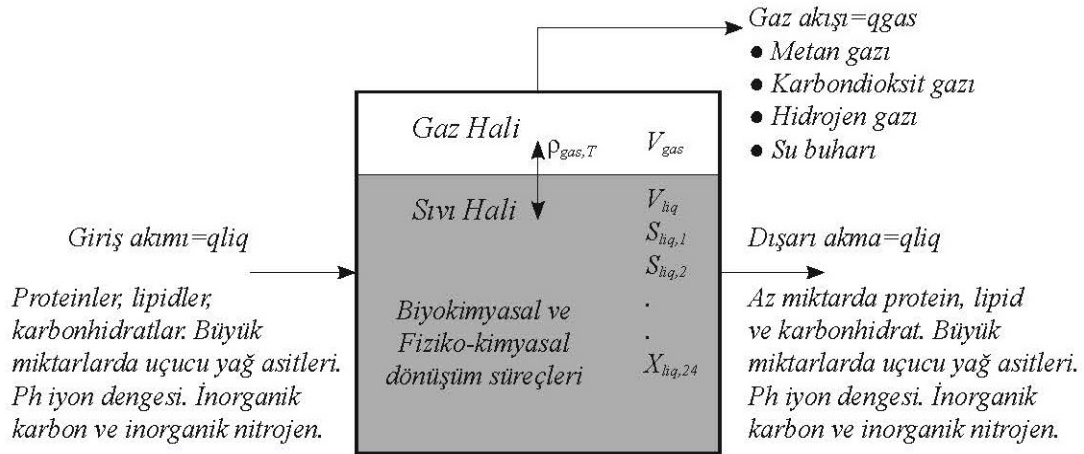
Anaerobik arıtma sistemlerindeki reaktör iki ayrı bölümden oluşmaktadır: 1. Maddelerin gaz halini, 2. Maddelerin sıvı halini barındıran bölümler (bkz: Şekil 2). Gaz halinin yer aldığı bölümün basıncı atmosferik basınca eşittir. Oluşan biyogaz ise bu bölümde toplanmaktadır. Gaz ve sıvı hali ayrı bölümlerde barındıran reaktör; sürekli karışım özelliğinde, tek giriş ve çıkış akımına sahip ve sıvı hacmi sabit olan bir reaktördür.

Modelin matematiksel olarak uygulanması, sıvı faz fizikokimyasal süreçlerin cebirsel veya kinetik oran eşitlikleri şeklinde uygulanmış olmasına bağlıdır. Fizikokimyasal süreçlerin cebirsel şekilde uygulandığı durumda diferansiyel ve cebirsel eşitlik çözümleyicisi gerekmektedir. Bu süreçlerin kinetik oran eşitlikleri şeklinde uygulanması durumunda daha

fazla sayıda diferansiyel eşitlik ile karşılaşılmaktadır. Bu yüzden model zorlaşmakta ve bazı hatalar gösterebilmektedir. Sıvı haldeki kütle denge eşitlikleri her bir bileşen için aşağıda gösterilen eşitlik 3.1' de verilmiştir.

$$\frac{dS_{liq}}{dt} = q_{liq} \frac{S_{liq}}{V_{liq}} - \left(q_{liq} \frac{S_{liq}}{V_{liq}} + P_i (i = 1,2,3,4..26) \right) \quad (3.1)$$

Eşitlik her bir bileşenin sıvı halde iken zamana bağlı değişimini ifade etmektedir. i bileşenin giriş akımından çıkış akımının çıkartılması ve bu işleme i bileşenin çürüme ifadesinin eklenmesiyle, bu matematiksel ifadeye erişilmektedir. Eşitliğin her bir bileşenin birbiriyle olan ilişkisi çürüme sabiti olan P_i ile tanımlanmıştır. Çürüme sabiti P_i ' nin bulunmasında ek 1' de verilen Peterson matrisinden faydalanılmaktadır[14].



Şekil 2. ADM1'deki sürekli karışımli reaktör tankı

Kaynak: (Batstone v.d., 2002)

Eşitlik 3.1'de verilen sıvı bileşenler için kütle eşitlik denklemine ek olarak, gaz haldeki bileşenler kütle transfer denklemi aşağıda yer alan eşitlik 3.2' deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{dS_{gas,i}}{dt} = - \frac{S_{gas,i} * q_{gas,i}}{V_{gas}} + \rho_{T,i} \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad (i = 33 - 35) \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'deki V_{liq} çürüme reaktöründeki sıvı hacmini; V_{gas} reaktördeki gazların toplanması için reaktörde ayrılmış hacmini; $S_{gas,i}$ ise Peterson matrisindeki i numaralı gazın konsantrasyonunu temsil etmektedir.

Reaktördeki tepkimeler sonucu meydana gelen gazlar reaktörün üst bölümünde bulunan boşlukta toplanmakta ve bu gazlar ilk önce buldukları sıvı halden, gaz haline

geçmektedirler. Bu geçiş hızı matematiksel olarak Eşitlik 3.2’ deki $\rho_{T,i}$ hız katsayısı ile ifade edilmektedir. Bu katsayı ise aşağıda verilen Eşitlik 3.3’ deki denklemle elde edilmektedir.

$$\rho_{T,i} = kLa(Sliq,i - c * KH, i qpgas, i) \quad (3.3)$$

Eşitlik 3’deki Sliq elemanı Peterson matrisindeki i numaralı gazın sıvı hal konsantrasyonunu temsil etmektedir. “c” katsayısı da kgKOİ’ dan kmole’e (“c” hidrojen için 1 ve metan gazı için ise 64’ dür.) dönüşüm faktörüdür. p_{gas} elemanı ise i numaralı gazın kısmi basıncını göstermekte ve ideal gaz davranışı gösterildiği varsayılarak hesaplanmıştır. KH elemanı i numaralı gaz için Henrys yasası sabitidir.

Reaktör içinde üretilen gazın akış miktarı hesaplanırken, Eşitlik 3.4’deki matematiksel ifade ADM1 modeli için alternatif bir yöntem olarak sunulmuştur. Bu yöntemde gaz akış yönünün sürekli olarak reaktördeki gaz çıkış bölümü boyunca olduğu varsayılmaktadır.

$$q_{gas} = kp(P_{tot} - P_{atm}) * \frac{P_{gas}}{P_{atm}} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4’deki P_{tot} bütün gazların kısmi basınçlarının toplamını, q_{gas} toplam gaz akışını ve bu iki elemanda su buharını içermektedir [17]. Su buharı için kısmi basınç ifadesi Batstone vd.’de (2002) verildiği şekilde kullanılmıştır [14]. P_{atm} ise atmosferik basıncı göstermektedir. Gaz basıncı birimi bar’ dır.

Reaktörde üretilen gaz hacimleri ideal gaz yasasına göre hesaplanmakta ve formül Eşitlik 3.5 ‘de verilmektedir.

$$V_i = \frac{P_{gas,i}}{P_{tot}} * q_{gas} \quad (i = 33 - 35) \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5 ‘deki V_i , i numaralı gazın hacimsel olarak akış hızını ifade etmektedir.

ADM1 modeli ilk olarak 2002 yılında ortaya çıkmış ancak zamanla değişime uğramıştır. Bu değişikliklerden biri pH hesaplama yöntemi olmuştur. Batstone vd.’ de (2002) hesaplama hassas bir şekilde yapılmadığından[14], Rosen ve Jepsen (2006) çalışmalarında pH hesaplama yönteminde daha hassas sonuç veren Eşitlik 3.6’ daki diferansiyel matematiksel eşitliği kullanılmışlardır[17]. Rosen vd. (2006) tarafından önerildiği gibi, modelde asit konsantrasyonu, asit ve baz çiftlerinin toplam miktarını ve asit baz çiftlerindeki negatif iyonlu bazların miktarını gösteren terimler ile ifade edilmiştir [17].

$$\frac{dS_{acid}^{-i}}{dt} = -K_a \left(\frac{s_{acid}^{-i}}{b} * (K_{a_{acid}} + s_{h^+}) - K_{a_{acid}} * s_{acid_{total}} \right) \quad (i = 27 - 32) \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6 'daki S_{acid} -, i numaralı asit için negatif yüklenmiş asit çiftini, $Sh^+ H_3O^+$ iyonunun mol/m^3 cinsinden miktarını ve S_{acid} , total asit baz çiftlerinin toplamını ifade etmektedir. Bununla birlikte, $-K_{a/b}$ asit baz reaksiyon katsayısını, K_{acid} ise mole cinsinden asit baz denge katsayısını göstermektedir.

Tanım	Eşitlik	Kullanım Amacı
Yarışmasız inhibisyon	$i = \frac{1}{1 + S_i / K_i}$	hidrojen inhibisyonu serbest amonyak inhibisyonu
Substrat limitasyonu	$i = \frac{S_i}{S_i + K_i}$	toplam amonyak kısıtlaması
Deneysel eşitlikler	$i = \frac{1 + 2 \times 10^{0.5(pH_{LL} - pH_{UL})}}{1 + 10^{(pH - pH_{UL})} + 10^{(pH_{LL} - pH)}}$	yüksek ve düşük pH inhibisyonu olduğunda, pH inhibisyonu
	$i = \exp\left(-3 \left(\frac{pH - pH_{UL}}{pH_{UL} - pH_{LL}}\right)^2\right) \Big _{pH < pH_{UL}} \Big _{pH < pH_{LL}}$	düşük pH inhibisyonu olduğunda, pH inhibisyonu

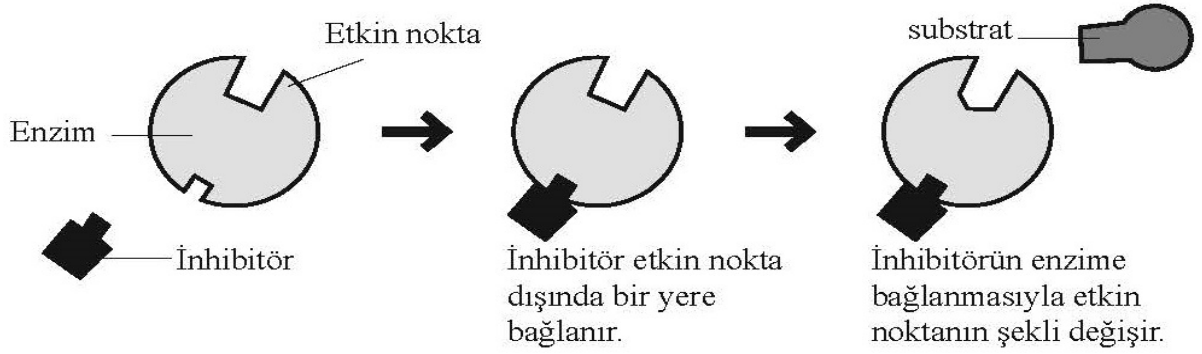
Şekil 3. Modelde kullanılan inhibisyon eşitlikleri

Kaynak: (Batstone v.d., 2002)

Modelde inhibisyona sebep olan etkenler sırasıyla hidrojen ve serbest amonyaktır. Modeldeki inhibisyonun matematiksel eşitlikleri Şekil 3' te verilmiştir. Şekil 3'teki deneysel eşitlikler bölümünde verilen ilk ifadede, alt ve üst pH limitleri (pH_{ul} ve pH_{ll}) sırasıyla mikroorganizmaların %50'sinin inhibe olduğu alt ve üst limit noktalarıdır. Örneğin asetat kullanan bakteriler 6.5-7.5 pH değerlerinde optimum düzeyde faaliyet gösterebilmektedirler. İkinci eşitlikte ise düşük pH değerinden kaynaklanan inhibisyon meydana gelmektedir. Bu durumda reaktör içinde biyogaz üretimi tamamen sonlanmaktadır. Örneğin modelde pH değeri 6 ve aşağı bir değere indiğinde asit oluşum bakterileri çok etkin olmakta, ancak metan oluşum bakterileri tamamen inhibe olup faaliyet göstermemektedirler.

Yukarıdaki Şekil 3'te gösterilen eşitlikler ile ifade edilen inhibisyon türü yarışmasızdır. Yarışmasız inhibisyon; inhibitörün enzimin substratın bağlanacağı yere değil de başka bir yere bağlanması ve bu sebeple enzim üzerinde substratın bağlanacağı alanı işgal ederek, substratın bağlanmasını engellemesidir. Yarışmasız inhibisyon Şekil 4' te gösterilmektedir.

Yarışmasız İnhibisyon

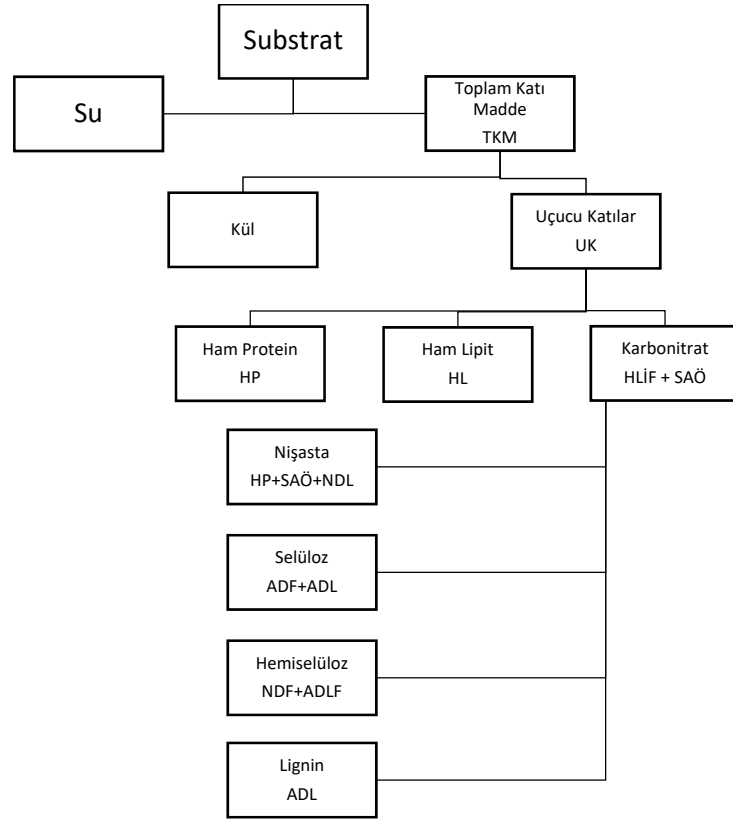


Şekil 4. Yarışmasız İnhibisyon

3.4. Substrat Karakterizasyonu

Modelin ilk sürümünde atık çamurun çürüme modellenmesi yapılmış ancak zaman içinde farklı organik maddelerin modellenmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle modelin gerçekçi sonuçlar verebilmesi için substrat karakterizasyonu yapılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bunun yanında organik maddelerin her birinin içerikleri protein, karbonhidrat, lipit ve çözünmez içerik yönünden birbirlerinden çok farklıdır. Bu durum ise modeldeki değişkenlerde önemli ölçüde değişiklik yaratmaktadır.

ADM1 modelinde simülasyon hesaplamalarında kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) temel alınmaktadır[18]. KOİ; organik maddelerin içinde barındırdığı karbonun oksitlenerek daha karalı olan karbondioksit ve suya dönüşmesidir. Bir organik maddenin oksitlenmesi aşağıdaki Şekil 5'deki reaksiyonlarla açıklanabilir.



Şekil 5. Substrat içeriğinin Weender analizi ile belirlenmesi.

Şekil 5’ deki TKM toplam katı maddedir. UK uçucu katı maddedir. HP ham proteindir. HL ham lipittir. RF ham yağdır. SAÖ serbest azot özüdür. NDL nötr deterjan lifidir. ADL azot deterjan lifidir. ADLG asit deterjan lignindir. ADLF asit deterjan lifidir.

KOİ dönüşümü Eşitlik 3.7’de sunulmuştur. Biyogaz santrallerinde modelleme yaparken KOİ’nin ölçülmesi için deneysel yöntemlerin uygulanması kolay değildir [18]. Bu yüzden KOİ, teorik olarak elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.8’de KOİ’nin teorik olarak hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade verilmiştir. Eşitlik 3.8’de görüldüğü üzere KOİ’nin teorik olarak hesaplanmasında ihtiyaç olan protein, karbonhidrat ve lipit bileşenlerinin barındırdığı karbon, hidrojen ve azot elementlerinin sayısı bilindiğinden teorik olarak KOİ’nin hesaplanması deneysel yöntemler ile edilmesine kıyasla daha kolaydır.

$$CaHbOcNd + \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} - \frac{3d}{4}\right) O_2 = aCO_2 + \left(\frac{b}{2} - \frac{3d}{2}\right) H_2O + dNH_3 \quad (3.7)$$

$$THOİ = \left(\frac{16(2a+0.5(b-3d)-c)}{12a+b+16c+14d}\right) \left(\frac{gO_2}{gCaHbOcNd}\right) \quad (3.8)$$

Şekil 5’ de görüldüğü üzere nişasta, selüloz ve hemiselülozün basit molekülü glikozdur. Bu yüzden teorik olarak oksijen ihtiyacı hesaplanırken, bu üç polimerin dijestiliterine bakılmaksızın Eşitlik 3.8’deki gibi tek bir kesirde toplanmakta; üçü için ayrı ayrı teorik oksijen ihtiyacı hesaplanmamaktadır [18]. Lignin yapısız bir polimer olup tanımlanmış bir yapısı yoktur ve anaerobik ortam koşullarında bozunabilir değildir. Modelde reaktörde oluşan lignin, yukarıdaki sebeplerden dolayı inert madde olarak tahsis edilmekte ve herhangi bir biyokimyasal tepkimeye girmemektedir [18].

Modelde karışık maddeyi temsil eden X_c ’ nin hesaplanması Eşitlik 3.9’deki denklemlerle yapılmaktadır. Karışık madde hesaplanırken ham protein (HP), ham lipid (HL), karbonhidratlar (Ham lif (HLİF) + Azotsuz Öz Madde (AÖM) – Asit Deterjan Lignin (ADL)) ve atıl madde (Asit Deterjan Lif (ADLİF)) kendi teorik oksijen ihtiyaçları ile çarpıldıktan sonra toplanmaktadır [18].

$$X_c = \rho_{\text{substrat}} * \text{TKM} * ((\text{HP} * \text{TEOD}_{\text{pr}}) + (\text{HL} * \text{TEOD}_{\text{li}}) + (\text{ADL} * \text{TEOD}_{\text{l}}) + (\text{HLİF} + \text{AÖM} - \text{ADL}) * \text{TEOD}_{\text{ch}}) \quad (\text{kgCOD}/\text{m}^3) \quad (3.9)$$

Eşitlikte 3.9’deki ρ_{substrat} elamanı substratın reaktör içindeki yoğunluğudur ve birimi kg/m^3 ’dür. TKM, yüzdesel olarak toplam katı madde içeriğini göstermektedir. TEOD_x ise protein, lipid, lignin ve karbonhidrata karşılık gelen teorik oksijen ihtiyacıdır [18]. Selüloz, hemiselüloz ve nişasta ilk olarak biyolojik bozunabilirliklerinden bağımsız olarak tek bir ifadeyle toplanmakta; daha sonra, protein (X_{pr}), lipid (X_{li}), karbonhidrat (X_{ch}) ve atıl maddeyi (X_{l}) içeren karışık madde (X_c) sabit stokiyometrik ifadeler (f -faktörleri) sayesinde yukarıda belirtilen içeriklerine ayrılmaktadır [18]. Karbonhidrat içeriğini oluşturan selüloz, hemiselüloz ve nişasta stokiyometrik ifadelerinin tek bir değer altında toplanmamasının sebebi, her birinin biyogaz dönüşüm hızlarının farklı olmasıdır. Bu yüzden eşitlik 3.9’deki karbonhidrat içeriği olan karma ($\text{HLİF} + \text{AÖM} - \text{ADL}$) ifadesinin bölünmesi gerekmektedir [19]. Weender analizi yardımı ile bulunan organik maddelerin besin içerikleri değerleri kullanılarak hesaplanan protein, lipid, karbonhidrat ve inert maddenin stokiyometrik ifadelerini gösteren eşitlikler aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Stokiyometrik ifadelerin eşitlikleri

Stokiyometrik Faktörler	Eşitlikler	Numara
Protein	HP/UK	1
Lipid	HL/UK	2
Karbonhidrat	$((HLİF + AÖM - ADL) + (NDF - ADL) * d)/UK$	3
Atıl Madde	$(ADL + ((NDF - ADL) * (1 - d)))/UK$	4

Tablo 2’de gösterilen “d” selüloz ve hemiselülozün bozunabilir bölümünü ifade eden yüzdesel orandır. Genellikle yüzde oranı d biyogaz üretim eğrisinin eğiminin bulunmasıyla hesaplanmaktadır. Ancak bozunabilirlik düzeyi olan Dvs biliniyorsa biyogaz üretim eğiminin bulunmasına gerek kalmadan kolaylıkla hesaplanabilmektedir. “d” yüzdesel oranının hesaplanması yöntemi aşağıda verilen Eşitlik 3.10’ da gösterilmektedir [19]. Bu çalışmada Dvs değeri Koch v.d.’ nin (yıl) çalışmalarındaki gibi %60 olarak alınmıştır.

$$d = \frac{NDF - UK(1 - Dvs)}{NDF - ADL} \quad (3.10)$$

Özetle modellemede substrat karakterizasyonunun yapılması farklı besin içeriğine sahip olan organik maddelerin farklı model çıktıları vermesi bakımından önem arz etmektedir. Substrat karakterizasyonunun yapılması için de modelin giriş parametrelerinden olan stokiyometrik ifadelerin bulunması gerekmektedir.

Takip eden bölümde ADM1 modelini uygulayan çalışmalar incelenmekte ve detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3.5. ADM1 Modeli Uygulamaları

ADM1 modelini ilk uygulayan çalışma grubunun amacı atık su arıtma tesisinde biyogaz üretimi ve arıtma işlemi ile ilgili diğer çıktıların modellemesini yapmaktı. Ancak zaman içerisinde, diğer araştırmacılar tarafından modele çeşitli iyileştirmeler getirilmiştir. Örneğin, modelin benzetim yaptığı biyogaz santralindeki reaktör tipi ve reaktörün kullandığı organik maddede farklılaşmaya gidilmiştir.

Koch vd.’ (2010) nin çalışmasında çim silajını kullanan iki eş özelliklere sahip biyogaz çevrim reaktörünün modellemesi yapılmıştır [18]. Mezofilik koşullarda çalıştırılan reaktörlerin hacmi 50 litre olup her gün çim silajı ile beslenmektedir. Reaktör içindeki karıştırıcının dakikada dönme sayısı 60’ dır. Model parametrelerinde Substrat

karakterizasyonu yöntemi kullanılarak modelin f-faktörleri (stokiyometrik faktörler) çim silajına göre uyarlanmıştır. Tablo 3’ de uyarlanan parametreler verilmektedir. Reaktör içindeki azot birleşmesinin ve serbestisinin reaktör içindeki amonyak konsantrasyonuna doğrudan etkisi vardır. Amonyak konsantrasyonundaki yükselme, çim silajının tek başına fermantasyonunda istikrarsızlığa yol açmaktadır. Stokiyometrik değişikliklere ek olarak, azot birleşmesi ve serbestisi olaylarının da model çıktılarının sağlıklı sonuç vermesi için modele dâhil edilmesi gerektiği saptanmıştır. ADM1’de çürüyen biokütle karışık madde içeriğinde tekrar işleme sokulmaktadır. Tekrar işleme sokulan çürümüş biokütle ile çürümemiş biokütlenin azot içerikleri dâhil çoğu karakteristik özellikleri farklıdır. Bu nedenle Koch vd. (2010), çürümüş biokütleyi farklı bir değişken olarak modelde tanımlamışlardır [18]. Bu farklılaşma ilk olarak Wett vd. (2006) tarafından önerilmiştir [20]. Bu durum ASM1’deki atıl çürümüş maddenin bileşiğinin ayrı bir parametre olarak tanımlanmasına benzemektedir. Bu farklılaşmaya göre uyarlanmış azot içeren ilgili maddelerin, azot içeriklerini gösteren yeni değerler Tablo 4’de verilmiştir. Tabloda yer alan parametrelerin modele dâhil edilmesiyle, toplam azot konsantrasyonunun simülasyonu düzgün bir şekilde yapılmaktadır. Ancak bu uyarlamayla, amonyak azotunun simülasyonunu yapmak mümkün olmamaktadır.

Bununla birlikte, reaktörde su eksikliği ve katı içeriğin fazlalığı anaerobik arıtma sürecini olumsuz etkilediğinden, Koch vd. (2010) sabit hidroliz oranlarının süreci yeterince iyi tanımlayamayacağını düşünmüşlerdir. Ayrıca Qu vd. (2009) çalışmalarında düşük nem ortamında gerçekleşen hidroliz sürecinin, daha fazla inhibe olma eğiliminde olduğunu ortaya koymuşlardır[21]. Bu sonuç, Koch vd. (2010) tarafından modele Eşitlik 3.11’deki matematiksel ifade ile entegre edilmiştir.

$$\rho_j = k_{hyd} * X * \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{TS}{K_{hyd}} \right)^{n_{hyd}}} \right) \quad (3.11)$$

Eşitlik 11’deki k_{hyd} : hidroliz hızını ifade etmektedir ve birimi g^{-1} ’dir ($g=gün$); X ilgili kısmın konsantrasyonunu belirtmektedir ve birimi kg_{cod}/m^3 ’dir. TS katıların konsantrasyonuna işaret etmektedir ve birimi kg_{TS}/kg_{fm} ’dir. K_{hyd} hidroliz etki katsayısıdır ve birimi kg_{TS}/kg_{fm} ’dir. n_{hyd} ise derece indeksini ifade etmektedir. Bu yeni eşitlik modele amonyak azotu eğrisinin simüle edilebilmesi için eklenmiş ve bu ekleme sayesinde reaktördeki katı içeriklerin hidroliz üzerindeki sert ve yumuşak etkilerinin tanımlanması mümkün hale gelmiştir [18].

Bunun yanında Koch vd.'nin (2010) çalışmalarında deneysel sonuçlarla elde edilen veri kullanarak anaerobik model girdi parametreleri üzerinde tahmin yöntemi uygulamışlardır [18]. Çalışmada, K_{S_H2} (hidrojenin yarı doygunluk katsayısı), $K_{I_H2_Pro}$ (propiyonat alımı için hidrojen inhibisyon sabiti), $K_{I_H2_C4}$ (valerat ve bütirat alımı için hidrojen inhibisyon sabiti), k_{m_Ac} (maksimum asetat alım oranı), K_{hyd} (hidroliz etki katsayısı), n_{hyd} (hidroliz etki derece endeksi) kinetik girdiler substrata göre kalibre edilmiştir.

Özetle Koch vd. (2010) azot birleşmesinin ve serbestisinin toplam amonyak konsantrasyonuna olan etkisini, Tablo 4' deki parametrelerin kalibrasyonu ile modele dâhil etmişlerdir. Reaktördeki düşük ve yüksek nem ortamına göre değişen hidroliz katsayısı Eşitlik 11'deki ifade ile modele eklenmiştir. Sırasıyla, Tablo 3 ve Tablo 4' de verilen stokiyometrik ve kinetik parametreler çim silajına göre uyarlanarak substratın organik içeriği modele entegre edilmiştir. Ayrıca çalışmada yukarıdaki anlatılan küçük değişikliklerin modele uygulanmasıyla modelin deneysel sonuçlara yakın değerler verdiği sonucuna varılmıştır [18].

Tablo 3. Stokiyometrik değerlerin çim silajı için uygulanması [18]

Parametreler	Tanım	Çim silajı için değerler
f_{pr_Xc}	Xc' deki proteinler	0.187
f_{Li_Xc}	Xc 'deki lipitler	0.033
f_{Ch_Xc}	Xc' deki karbonhidratlar	0.401
f_{Xi_Xc}	Xc' deki atıl madde	0.379
d	Selülozun ve hemiselülozün parçalanabilir bölümü	0.36

Tablo 4. Azot barındıran maddelerin azot içerikleri [18]

Parametreler	Birimler	Açıklama	Değer
N_{aa}	KmolN/kgcod	Amino asitlerdeki azot içeriği	0.007
N_{xc}	KmolN/kgcod	Karışık maddedeki azot içeriği	0.0013
f_p		Stokiyometrik faktör	0.08
N_{xb}	KmolN/kgcod	Biokütledeki azot içeriği	0.00625
N_{xp}	KmolN/kgcod	Biokütlenin çürüyen kısmındaki azot içeriği	0.0043

Koch vd.'nin (2010) çalışmalarının yanında Satpathy vd.'nin (2013) çalışmalarında tavuk gübresini kullanan bir biyogaz santrali için ADM1 modeli uygulanmıştır [22]. Bu çalışmada tavuk gübresi aşağı Saksonya bölgesinde bulunan bir tavuk çiftliğinden elde edilmiştir. Bilindiği üzere inoklumun biyogaz üretimindeki rolü çok önemlidir. Bu yüzden substrata göre adapte edilmiş inokulum seçilmelidir. Satpathy vd.'nin (2013) çalışmalarında anaerobik çürümeyi gerçekleştirecek olan aktif bakterileri barındıran inoklum tavuk gübresinden biyogaz üreten bir santralden elde edilmiştir [22]. Tavuk çiftliğinden elde edilen substratın özellikleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Tavuk gübresi için Weender Analizi sonuçları [22]

Analiz edilen parametre	Örnekteki miktarı
Asit Deterjan Lif	39.7g
Asit Deterjan Lignin	11.1g
Ham Lif	26.5g
Nötr Deterjan Lif	44.3g
Yağ	9.1%

Çalışmada samanla karıştırılan tavuk gübresinin biyogaz üretim potansiyelini elde edebilmek için, 1100 ml hacmindeki kesikli reaktörde %20 substrat ve %80 inokulum oranında karışım hazırlanarak, bu karışımın biyogaz üretimi 15 gün boyunca her saat biyogaz üretim verisi alınarak incelenmiştir. Kararlı durumda bu karışımın 4.6 L biyogaz üretebildiği gözlemlenmiştir. Bu ölçüm çalışması modelin kinetik parametreleri üzerinde, substrata uygun değişiklikler yapmak için gerçekleştirilmiştir. Tavuk gübresine göre değiştirilmiş modelin kinetik parametreleri Tablo 6'de verilmiştir.

Çalışmada modelleme ADM1'in değişikliğe uğramamış halini içeren SIMBA adlı bir simülasyon programıyla yapılmıştır. SIMBA, ADM1 modelini kullanarak biyoenerji santrali simülasyonu yapmaya yarayan bir yazılım programıdır. Bununla birlikte, kinetik parametrelerin tahmini Nelder-Mead simpleks yöntemi aracılığıyla SIMBA programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada modellenen biyogaz santralinin 8443 m³/g biyogaz üretebileceği öngörülmüştür.

Satpathy vd.'nin (2013) çalışmalarında, ADM1'in biyogaz üretim miktarını ve verimini tahmin edebilmek için etkili bir araç olduğu ifade edilmektedir [22]. Buna ek olarak, substrat karakterizasyonu ile modelin farklı substratlar için gerçek ölçekli biyogaz santrallerinin modellenmesinde de etkili sonuçlar verdiği belirtilmektedir.

Tablo 6. Satpathy vd. (2013) çalışmasında kalibre edilen model parametreleri

Deneysel sonuçlara göre uyarlanan ADM1 model parametreleri	Değerler
Xc	120kg COD/m ³
Xc'nin protein bölümü	0.22
Xc'nin lipid bölümü	0.12
Xc'nin karbonhidrat bölümü	0.31
Xc'nin atıl kısmı	0.36
Disintegrasyon oranı(k_dis)	4.8514 g ⁻¹
Karbonhidratların hidroliz oranı(k_hyd_CH)	0.7601 g ⁻¹
Lipitlerin hidroliz oranı(k_hyd_LI)	0.5296 g ⁻¹
Proteinlerin hidroliz oranı(k_hyd_PR)	0.7626 g ⁻¹

Yukarıdaki çalışmalara ek olarak Blumensaat vd.'nin (2005) çalışmalarında pilot ölçekli bir anaerobik arıtma sisteminin ADM1 kullanılarak modellenmesi yapılmıştır [23]. Söz konusu çalışmada anaerobik sistem iki aşamalı reaktörden meydana gelmektedir. Ayrıca reaktörlerin ikisi de tam karışımly yapıya sahiptir. İki aşamalı reaktör sisteminin ilk aşamasında, reaktör mezofilik (35 °C) koşullarda, ikinci aşamasında ise termofilik (55 °C) koşullarda çalıştırılmaktadır. Mezofilik koşullarda çalıştırılan reaktörün hacmi 800 L ve termofilik koşullarda çalıştırılan reaktörün hacmi 160 L' dir. Bu iki aşamalı sistem BNR isimli arıtma tesisinden elde edilen primer ve sekonder arıtım çamuru karışımıyla günde 40 L beslenmiştir. Bu besleme sonucunda hidrolik bekleme süresi termofilik reaktörde 4 gün ve mezofilik reaktörde 20 gün şeklinde gerçekleşmektedir [23].

Çalışmada, Batstone vd. (2002) tarafından önerilen karbon ve azot dengesini ifade eden stokiometrik katsayılar ve parametreler [14] kullanılarak modelleme çalışması yapılmış ve

her iki maddenin denge ifadesindeki eksiklikler bulunmuştur. Bu eksikleri gidermek için bünyesinde karbon ve azot içeren maddelerin karbon ve azot dengesi eşitlikleri üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Yapılan değişikliklere aşağıda değinilmektedir.

İnorganik karbon için oran katsayıları Eşitlik 3.12’de gösterilen şekilde ifade edilmiştir. Modelin orijinal sürümünde bu eşitlik biyokimyasal süreç olan şeker, amino asit, propiyonat, asetat ve hidrojen alımına uygulanmakta (j=5, 6, 10, 11, 12) çünkü bu durumlarda inorganik karbon, anabolizmanın ve katabolizmanın ürünü veya karbon kaynağı olmaktadır. Blumensaat vd. (2005) çalışmalarında organik karbon ve inorganik karbon eşitlik ifadelerinin hepsini içeren Eşitlik 3.12’de verilen ifadeyi önermiş ve kullanmışlardır.

$$v_{15,j} = - \sum_{i=1-13,16-30} C_i v_{i,j} \quad (3.12)$$

Kaynak Blumensaat vd. (2005)

Eşitlik 3.12’deki C_i ilgili bileşiğin karbon içeriğini ifade etmektedir. Birimi $\text{kmol C kg KOİ}^{-1}$ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) dir. $v_{15,j}$ ise ilgili sürecin inorganik karbon stokiyometrik katsayısıdır.

Bunlara ek olarak Blumensaat vd. (2005) çalışmalarında çürüme süreçleri için inorganik karbon dengesi tanımlanmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen karbon denge kontrolleri sayesinde biyokütlenin parçalanmasıyla ortaya çıkan inorganik karbon miktarının, karbon dengesine katkısının ADM1’de tanımlanmamış olduğu ortaya çıkarılmıştır. Parçalanmış biyokütlenin sistemde parçacıklı kompozit olarak kaldığı varsayılmakta, partiküler kompozit daha sonrasında parçacıklarına ayrılmakta ve ardından hidrolize uğrayarak çözünebilir substrata çevrilmektedir. Karbon dengesine katılan parçacıklı kompozitin karbon içeriği (C_c) $0.03125 \text{ kmol C kgKOİ}^{-1}$ ve normal biyokütlenin karbon içeriği (C_{bac}) $0.0279 \text{ kmol C kgKOİ}^{-1}$ ’dir. Çalışmada bu farklılık temel alınarak, parçalanmış biyokütlenin içerdiği karbon miktarının karbon dengesine katkısıyla, normal biokütlenin içerdiği karbon miktarının karbon dengesine katkısının aynı şekilde ifade edilemeyeceği sonucuna varılmıştır. Bu sebeple parçalanmış biyokütleden gelen karbon içeriği Eşitlik 3.13’deki matematiksel ifadeyle modele dâhil edilmiştir.

$$v_{15,j} = - \sum_{i=19-23-29} C_i v_{i,j} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13’de C_i ilgili bileşiğin karbon içeriğini göstermektedir; birimi $\text{kmol C kg COD}^{-1}$ ’dir. $v_{15,j}$ ise ilgili sürecin inorganik karbon stokiyometrik katsayısıdır.

Çalışmada, modelin orijinal sürümündeki kompozit maddeden gelen karbon içeriğinin, karbon dengesine katkısını ifade etmek için yapılan değişikliğin bir benzeri, kompozit maddeden gelen azot içeriğinin azot dengesine katkısını ifade etmek için de yapılmıştır. Bunun nedeni ise kompozit maddenin azot içeriği ile normal biokütlenin azot içeriğinin farklı olmasıdır. Kompozit maddenin ve normal biokütlenin azot içeriği sırasıyla 0.002 kmol N kgCOD⁻¹ ve 0.00625 kmol N kgKOİ⁻¹'dir. Bu farklılık çalışmada Eşitlik 3.14' deki gibi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Eşitlik 3.14' de görüldüğü üzere kompozit maddeden gelen azot içeriği özel olarak belirlenmiş ve modele dâhil edilmiştir.

$$v_{15,j} = - \sum_{i=19-23-29} N_i v_{i,j} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14'deki N_i ilgili bileşiğin Azot içeriğini göstermektedir ve birimi kmol N kg COD-1'dir. v_{15,j} ise ilgili sürecin inorganik azot stokiyometrik katsayısıdır.

Çalışmadaki modelde kullanılan başlangıç parametrelerinin çoğu literatürdeki yapılan benzer çalışmalardan elde edilmiştir. Örneğin oran eşitlik denklemlerinde uygulanan stokiyometrik katsayılar Batstone vd. (2002) çalışmasından alınmıştır [14]. Ayrıca yukarıda anlatılan karbon ve azot içerikleri üzerinden yapılan değişikliğe ek olarak, oran eşitlik matrisi üzerinde ilgili karbon ve azot stokiyometrik katsayılarında da değişiklik yapılmıştır. Denge katsayısı ve sabitleri gibi fizikokimyasal parametrelerin çoğu Batstone v.d. (2002) çalışmasından alınmış [14] ve kısıtlı sayıdaki fizikokimyasal parametre ise Stumm ve Morgan'ın (1996) çalışmalarından elde edilmiştir [24]. Anaerobik sistemlerde kinetik parametrelerin birçoğu kısıtlı değişkenliğe sahiptir ve bu yüzden anaerobik sistemlerde kinetik parametrelerin birçoğu sabit değerlere sahiptir [25]. Çalışmadaki kinetik parametreler, çeşitli çalışmalardaki (örn: Batstone, 2000 [25]; Costello 1989 [26]; Romli, 1993 [27]; Ramsey, 1997 [28]) kinetik parametrelerin incelenip karşılaştırılması sonucunda, model çıktılarının en hassas sonuçlar verdiği parametre değerleri seçilmiştir. Modeldeki 8 adet parametre, modelin gerçekçi sonuçlar verebilmesi için kalibre edilmiştir. Bunun nedeni söz konusu 8 parametrenin modelleme sonuçlarının üzerindeki etkisinin büyük olmasıdır. Kalibrasyonu yapılan parametreler aşağıdaki Tablo 7'de verilmektedir.

Tablo 7. Çalışmada kalibre edilen parametreler. [23]

Değiştirilen parametreler	Parametrelerin önceki değerleri(meso/termo)	Kalibre edilen değerler (meso/termo)	Birimler
$k_{dis,35/55}$	Parçalanma sabiti	1.0/0.5	g^{-1}
$k_{m,ac}$	Asetat kullanıcıları için maksimum asetat alım oranı	9/25	Kg $KOİkgKOİ^{-1} d^{-1}$
$k_{m,pro}$	Propiyonat kullanıcıları için maksimum asetat alım oranı	9/16	Kg $KOİkgKOİ^{-1} d^{-1}$
$k_{s,ac}$	Asetat kullanıcıları için yarı doyum sabiti	0.15/0.4	$kg KOİm^{-3}$
$k_{s,pro}$	Propiyonat kullanıcıları için yarı doyum sabiti	0.2/0.4	$kg KOİm^{-3}$
$k_{s,H2}$	Hidrojen kullanıcıları için yarı doyum sabiti	$7 \times 10^{-6}/1 \times 10^{-5}$	$kg KOİm^{-3}$
$k_{i,h2,pro}$	Propiyonat kullanıcıları için hidrojen inhibisyon sabiti	$3.5 \times 10^{-5}/$ 7×10^{-6}	$Kg KOİm^{-3}$
k_{i_NH3}	Asetat kullanıcıları için amonyak inhibisyon sabiti	0.0011/0.011	$Kmol m^{-3}$

Ayrıca çalışmada yapılan değişiklikler ve parametre kalibrasyonlarının başarısını değerlendirmek için, pilot ölçekli iki aşamalı sistem vasıtasıyla elde edilen deneysel sonuçlar model çıktılarıyla karşılaştırılmıştır. Bu kıyaslama sonucunda modelin sağlıklı sonuçlar verebilmesi için parametre kalibrasyonunun önemine dikkat çekilmiştir. Buna ek olarak, karbon ve azot dengesinin modelin orijinal sürümdeki hali ile doğru bir biçimde ifade edilmediği belirtilmektedir. Bu yüzden Eşitlik 3.12, 3.13 ve 3.14’ deki ifadelerin modele eklenmesi gerektiğinin altı çizilmektedir. Son olarak çalışmada, ADM1 modelinin; aşırı yükleme durumunda ve aynı operasyon koşulları altında, farklı substratlar kullanılması durumunda test edilmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Gali vd.' nin çalışmalarında yedi farklı zirai atığın substrat olarak kullanıldığı laboratuvar ölçekli anaerobik sistemin modellenmesi yapılmıştır. Bu sisteme beslenen uçucu katıların miktarı 4.3 g ve reaktördeki organik yükleme miktarı ise 1.09 g/(L.g)' dir. Reaktör mezofilik koşullarda çalıştırılmış olup hidroliz bekleme süresi 20 gündür. Modellemesi yapılan substratlar domuz gübresi, kolza, günçiçeği, giliserol, portakal, armut ve elma meyvelerinin posalarından oluşmaktadır. ADM1'in orijinal sürümü yerine Gracia vd. tarafından geliştirilen sürümü kullanılmıştır [29].

Çalışmada modelin girdilerinden olan stokiyometrik ve kinetik parametrelerin çoğu modelin orijinal sürümdeki değerleriyle aynıdır. Modelde kullanılacak her bir substrat için; parçacıklı madde (X_c) kısımları olan f-faktörleri kalibre edilmiştir. Bununla birlikte parçalanma sabitleri modellenmesi yapılan substratlara göre karakterize edilmiştir. Kalibre edilen f-faktörleri Tablo 8' de verilmiştir. Anaerobik sistemlerde partiküler organik maddenin toplam hidroliz oranı metan üretimi üzerinde kısıtlayıcı rol oynadığından, bu yüzden çalışmada toplam hidroliz oranı substrat içeriğine göre kalibre edilen parametreler arasında yer almaktadır. Kalibre edilen toplam hidroliz katsayısı Tablo 9' da verilmiştir.

Tablo 8. Substratlara göre kalibre edilen f-faktörleri [29]

Substrat	f_{chxc1}	f_{prxc1}	f_{iixc1}	f_{xixc1}	f_{sixc1}
Domuz Gübresi	0.461	0.202	0.161	0.033	0.143
Kolza	0.556	0.126	0.122	0.166	0.122
Gün çiçeği	0.506	0.198	0.034	0.078	0.184
Giliserol	0.477	0.020	0.0140	0.337	0.153
Portakal	0.399	0.016	0.084	0.1340	0.367
Armut	0.256	0.011	0.055	0.255	0.422
Elma	1	0	0	0	0

Tablo 9. Substrata göre kalibre edilmiş toplam kinetik oranlar [29]

Substrat	Domuz Gübresi	Kolza	Gün çiçeği	Giliserol	Portakal	Armut	Elma
Toplam hidroliz oranı(K_{dis})	0.17	0.24	0.23	0.5	0.29	0.18	0.15

Çalışmada modellenmesi yapılan laboratuvar ölçekli anaerobik sistemin amonyak miktarı, biyogaz üretimi, biyogazın içerdiği metan oranı, sistemin pH'ı, çözünebilir KOİ, alkaliliği ve uçucu katı madde miktarı, model çıktılarıyla karşılaştırılmış ve her bir parametrenin bağıl hatası bulunmuştur.

Çalışmada yapılan kıyaslama sonucunda bağıl hatanın en fazla %9 olduğu görülmekte olup model çıktılarının tatmin edici düzeyde doğruluğa sahip olduğu belirtilmektedir. Modelin, tarım atıklarının substrat olarak kullanan reaktörleri tasarlamak ve operasyon süreçlerini izlemekte başarılı bir araç olduğu ifade edilmektedir. Ancak modelde yukarıda bahsi geçen değişikliklerin uygulanması gerekliliği vurgulanmaktadır [29].

Bu çalışmalara ek olarak Page vd.'nin (2008) çalışmasında süt ineği gübresini substrat olarak kullanan iki çiftlikteki biyogaz santrallerinin modellenmesi yapılmaktadır[30]. Çiftliklerden biri 550 inek barındırmaktadır. Diğer çiftlik bünyesinde 860 inek barındırmaktadır. Her iki çiftlikte reaktörler mezofilik koşullarda çalıştırılmaktadır. 1. reaktörün hacmi 1.120 m³ ve hidrolik bekleme süresi 34 gündür. Diğer çiftlikteki reaktörün hacmi 2.006 m³ ve reaktördeki hidrolik bekleme süresi 29 gündür. Bu iki çiftlikteki reaktörde piston akımlı tiptedir. Ancak bilindiği üzere ADM1'de modellenmesi yapılan reaktör tipi tam karıştırılmalı sürekli reaktör olduğundan; çalışmada piston akımlı reaktörün seri bağlanmış sürekli karıştırılmalı 4 reaktörden meydana geldiği varsayılarak modelleme yapılmıştır.

Tablo 10. Page vd.' nin (2008) çalışmasında değiştirilen model giriş parametreleri

	Tanım	Sembol	Değeri	Birimi
Çözünür Bileşenler	Monosakkaritler	S_su	5	kgKOİ·m ⁻³
	Toplam valerat	S_va	1.21	kgKOİ·m ⁻³
	Toplam bütirat	S_bu	0.77	kgKOİ·m ⁻³
	Toplam propiyonat	S_pro	1.3	kgKOİ·m ⁻³
	Toplam asetat	S_ac	2.16	kgKOİ·m ⁻³
Partiküler Bileşenler	Karbonhidratlar	X_ch	18	kgKOİ·m ⁻³
	Proteinler	X_pr	31	kgKOİ·m ⁻³
	Lipidler	X_li	1.7	kgKOİ·m ⁻³
	Parçacıklı atıl madde	X_l	35.3	kgKOİ·m ⁻³
Çürütücü	Asetat çürütücüleri	X_ac	1.2	kgKOİ·m ⁻³
	Hidrojen çürütücüleri	X_h2	0.5	kgKOİ·m ⁻³
	Şeker çürütücüleri	X_su	0.27	kgKOİ·m ⁻³
	Amino asit çürütücüleri	X_aa	0.78	kgKOİ·m ⁻³
	UZYA çürütücüleri	X_fa	0.15	kgKOİ·m ⁻³
	Valerat ve bütirat çürütücüleri	X_c4	0.28	kgKOİ·m ⁻³
	Propiyonat çürütücüleri	X_pro	0.09	kgKOİ·m ⁻³
Asit oluşum bakterileri için kinetik parametreleri	Asetat verimi	Y_ac	0.07	kg KOİ_X/ (kg KOİ_X.d)
	Asetat alım oranı	k_m_ac	15	kg KOİ_AC/ (kg KOİ_X.d)
	Asetat için yarı doygunluk sabiti	K_S_ac	0.05	kg KOİ_AC/ (kg KOİ_X.d)
Çürüme oranları	Asetat oluşum bakterileri için çürüme oranı	K_decXi	0.04	g ⁻¹

Çalışmada reaktöre giren ve reaktörden çıkan malzeme analiz edilmiştir. Analizler sonucunda toplam inorganik azot, uçucu yağ asitleri konsantrasyonları, asetat oluşum ve metan oluşum bakterilerinin miktarları elde edilmiştir. Bu analiz sonuçları kullanılarak

model parametreleri kalibre edilmiştir. Çalışmada kalibre edilen model parametreleri Tablo 11' de verilmektedir.

Kalibrasyonlar yapıldıktan sonra model çıktıları laboratuvar ölçekli deney düzeneğinin çıktılarıyla karşılaştırılmaktadır. Biyogaz üretim miktarı ve içeriği, KOİ indirgenmesi, inorganik azot konsantrasyonu ve uçucu yağ asitleri karşılaştırılan parametrelerdir. AA Dairy çiftliğindeki santralde üretilen biyogaz miktarının model çıktılarıyla örtüştüğü ancak Gordondale çiftliği santralindeki model çıktısının üretilen biyogaz miktarını eksik tahmin ettiği görülmektedir ve bu çiftliklerde üretilen biyogaz miktarları yatışkın durum (steady state) için sırasıyla: $3.1\text{m}^3/(\text{inek.gün})$ ve $2.2\text{m}^3/(\text{inek.gün})$ olmaktadır. Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında oluşan fark, karbonhidrat, monosakkarit, protein ve lipid konsantrasyonları için modelin giriş parametrelerinin, başka bir modelleme çalışmasında kullanılan tahmine dayalı değerlerden elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Çalışmada, modele uygulanacak kalibrasyondan sonra biyogaz üretimi ve uçucu yağ asitlerinin tahmini hususunda gerçek sonuçlara yakın değerler verdiği vurgulanmaktadır. Ancak genel anlamda değerlendirildiğinde, çalışmadaki modelin tatmin edici tahminler yaptığı sonucuna varılmaktadır.

4. UYGULAMA

Bu çalışmada tavuk gübresi ve büyükbaş atıklarını substrat olarak kullanan santrallerin modellenmesi Matlab programı yardımıyla ADM1 modeli kullanılarak bilgisayar ortamında yapılmıştır. Üç farklı substrat için mezofilik ortam koşullarında, farklı sıcaklık ve organik yükleme hızlarında modelleme yapılmıştır. Modellemesi yapılan ilk substrat sığır atığı, ikinci substrat tavuk atığı ve üçüncü substrat, ilk substrata göre daha düşük organik içeriğe sahip başka bir sığır atığıdır. Çalışmada reaktörün toplam hacim ölçüsü, modelin orijinal halindeki ölçü referans alınarak 3700 m³ olarak belirlenmiştir. Reaktörün 300 m³' ü üretilen gazların toplandığı geriye kalan 3400 m³' ü ise katıları ve sıvıları içeren bölümden oluşmaktadır. Modelleme çalışmasında sıcaklık mezofilik koşullarda tutularak 25, 30 ve 35 °C' ye ayarlanmış ve sıcaklık değişiminin reaktör içindeki biyogaz üretim miktarı, biyogaz içeriği, 1 gram UKM başına metan üretimi ve reaktör içindeki pH değeri üzerine etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak söz konusu sıcaklık koşullarında organik yükleme hızları (OYH) 1, 1.5 ve 2 kg UKM/m³ seçilerek OYH' nin biyogaz üretimi ve içeriği, 1 gram UKM başına metan ve biyogaz üretimi ve reaktör içindeki pH değeri üzerine etkisi analiz edilmiştir.

ADM1 modeli Matlab programında Rosen vd. (2006) çalışmasındaki [31] gibi kodlanmıştır. Substratların farklı organik içeriklerini ifade edebilmek için modelin substrata ait giriş parametreleri üzerinde substratın organik içeriğine uyan kalibrasyonlar yapılmıştır. Bu kalibrasyonlara ek olarak, reaktörün işletildiği sıcaklığın değişimini modelde matematiksel olarak ifade edebilmek için, modelin kinetik katsayıları sıcaklık farklılığını tanımlayan katsayılarla çarpılmıştır. OYH' leri, organik yükleme miktarı değiştirilip reaktörün hacmi sabit tutularak, istenilen yükleme hızlarına uygun olacak şekilde uyarlanmıştır. Tüm model çalışmaları 300 günlük reaktör işletme süresi için yapılmıştır.

Yukarıda değinilen katsayı ve parametre kalibrasyonlarının model üzerinde etkisini daha açık bir şekilde ortaya koyabilmek için bu değişkenler üzerinde hassasiyet analizi yapılmıştır. Etkisi incelenmek istenen parametrenin değeri yüzde 80 azaltılarak yüzde 40' ine kadar yüzde 2' arttırılarak her adım için analiz gerçekleştirilmiş ve elde edilen her biyogaz üretim değeri analiz için grafik çizdirilmiştir. Ek olarak parametrelerin metan ve karbondioksit üretimi üzerine etkisini incelemek için parametrenin değerinin % 20' sinden % 40' üne kadar % 2 aralıklarla arttırılarak metan ve karbondioksit üretimleri incelenmiştir.

Bu işlem tavuk atığı üzerinde 35 santigrat derece sıcaklık altında 2 kg / m³ g OYH' de gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada ilk modellenen substrat büyükbaş hayvan atığı, ikinci substrat tavuk gübresi ve üçüncü substrat, ilk substrata göre daha düşük organik içeriğe sahip olan başka bir büyükbaş hayvan atığıdır. Bu analizi gerçekleştirebilmek için modelde substratı tanımlayan parametreler üzerinde gerekli değişiklikler yapılmıştır. Substratların organik içeriğine göre uyarlanan parametrelerin listesi sırasıyla; Tablo 11, Tablo 6 ve Tablo 12' de verilmiştir. Diğer tüm parametreler modelin orijinal halindeki değerleriyle kullanılmıştır. Tablo 12' de modelleme çalışmasında kullanılan ilk substrata uygun olarak karakterize edilen model parametreleri verilmiştir. Bu substrat büyükbaş hayvan atığıdır. Bu substrat % 6.4 oranında katı madde, katı maddenin % 80.60' ı kadar UKM içermektedir.

Tablo 11. Sığır atığına (birinci substrat) göre değiştirilen model parametreleri [32]

Parametre	Değeri	Parametre	Değeri	Parametre	Değeri	Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
S _{va}	0.548	S _{in}	0.18	X _{ac}	0.018	k _{hyd,li}	0.31	K _{S,pro}	0.392
S _{bu}	1.148	X _{su}	0.60	X _{h2}	0.018	pH _{UL,ac}	8	k _{m,ac}	7.1
S _{pro}	2.045	X _{aa}	0.60	S _{cat}	0.040	pH _{LL,ac}	6	K _{S,h2}	3.10 ⁻⁵
X _{xc}	0.50	X _{fa}	0.60	S _{an}	0.075	k _{m,C4}	13.7	S _{ac}	5.566
X _{pr}	18.11	X _{c4}	0.60	k _{hyd,ch}	0.31	K _{S,C4}	0.357	X _{ch}	13.94
X _{li}	7.49	X _{pro}	0.60	k _{hyd,pr}	0.31	k _{m,pro}	5.5		

Model çalışmasında kullanılan ikinci substrat tavuk gübresidir. Bu substrata ait model giriş parametreleri Tablo 6' de verilmiştir. Modellenen tavuk gübresinin katı madde içeriği %9.8 ve bu katı maddenin % 76.9 UKM' dir [32].

Modelleme çalışmasında kullanılan üçüncü substrat, birinci substrat gibi büyükbaş atığıdır. Ancak farklı organik içeriklere sahiptir, bu yüzden giriş parametreleri farklıdır. Bu farklı içeriğe sahip atığı kullanan reaktörünün işletme sıcaklığı 35°C ve organik yükleme hızı 2 kg UKM/m³' dir. Substrata uygun olarak değiştirilen giriş parametreleri Tablo 13'de verilmiştir. Üçüncü substrat % 5.23 katı madde içermekte ve bu katı maddenin % 76.67 si UKM' den oluşmaktadır.

Tablo 12. Üçüncü substrata göre değiştirilen model parametreleri [33]

Parametreler	f_{pr_xc}	f_{li_xc}	f_{ch_xc}	f_{XI_xc}
Değerler	0.185	0.042	0.264	0.509
Parametreler	k_{dis}	$k_{hyd,ch}$	$k_{hyd,pr}$	$k_{hyd,li}$
Değerler	1.540	0.037	0.099	0.225

Model parametreleri üzerindeki sıcaklığa bağlı değişiminin model üzerindeki matematiksel tanımlaması Bergland vd. (2015) çalışmasında önerilen şekilde yapılmıştır [33]. Modeldeki kinetik parametreler sıcaklık katsayıları ile çarpılmıştır. Kinetik parametrelere ait sıcaklık çarpanları Tablo 13’ de verilmektedir.

Tablo 13. Kinetik parametrelere ait sıcaklık çarpanları.

		Sıcaklık katsayılarıyla çarpılan parametreler											
Katsayıları	Sıcaklık	°C	k_{dis}	$k_{hyd,ch}$	$k_{hyd,pr}$	$k_{hyd,li}$	$k_{m,su}$	$k_{m,aa}$	$k_{m,fa}$	$k_{m,C4}$	$k_{m,pro}$	$k_{m,ac}$	$k_{m,h2}$
	25	0.48	0.48	0.48	0.48	0.21	0.21	0.21	0.67	0.70	0.48	0.48	
	30	0.74	0.74	0.74	0.74	0.22	0.22	0.22	0.86	0.90	0.70	0.70	
	35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Kaynak: Bergland vd. (2015)

Sıcaklığın kinetik parametrelerin üzerindeki etkisinin yanı sıra, fizikokimyasal süreçler üzerinde de etkisi vardır. Bu yüzden modelde fizikokimyasal sürece ait bir parametre üzerinde değişiklik yapılmıştır. Değiştirilen parametre gaz transfer katsayıdır. Modelin orijinalinde sabit bir katsayı olan bu parametre, sıcaklığa bağlı olarak değişen bir fonksiyonla ifade edilmiş ve eşitlik 4.1’de sunulmuştur[34].

$$k_{L,a} = 0.56 * T + 27.9 \quad (4.1)$$

Organik yükleme hızları 25, 30 ve 35 °C sırasıyla 1, 1.5 ve 2 kg UKM/m³ olarak belirlenerek analiz yapılmıştır. OYH’ yi istenilen değerlere ayarlamak için modelde organik yükleme miktarı (OYM) üzerinde değişiklik yapılmıştır. Volümetrik olarak yükleme miktarı Eşitlik 4.2’ de verilen ifadeye göre hesaplanmış ve birinci substrat için 1, 1.5 ve 2 kg UKM/m³ OYH’ lerinde sırasıyla şu şekilde bulunmuştur; 65.911, 98.867 ve 131.823 m³/gün. HBS’

ler ise sırasıyla 50, 25 ve 12,5 gündür. İkinci substrat için 1, 1.5 ve 2 kg UKM/m³ OYH'lerinde organik yükleme miktarları sırasıyla şu şekildedir; 45.115, 67.6725 ve 90.23 m³/gün. HBS'ler ise sırasıyla 75, 37.5 ve 18.75 gündür. Modelleme çalışmasında kullanılan üçüncü substratın OYH' si 2 kg UKM/m³' dir. Bu hız için organik yükleme miktarı 169.562 m³/gün ve HBS' si ise 20 gündür.

$$OYH = \frac{\text{Günlük toplam UKM yüklemesi}}{\text{Toplam kullanılabilir çürütücü hacmi}} \left[\frac{\text{kg UKM}}{\text{m}^3 \cdot \text{gün}} \right] \quad (4.2)$$

Takip eden bölümde modelleme çalışması ile elde edilen sonuçlara yer verilmektedir.

5. BULGULAR TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde 3 farklı organik içerikteki atığı substrat olarak kullanan reaktörlerin modelleme sonuçları sunulmaktadır. Reaktör toplam 3700 m³' dür. Reaktörün 300m³' ü gazların toplandığı bölümden oluşmaktadır kalan 3400 m³' lük kısmı sıvı ve katıların toplandığı arıtma işleminin gerçekleştiği kısımdan meydana gelmektedir. Çalışmada yukarıda hacimsel ölçüsü verilen reaktörün 9 farklı durum altında modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modelleme koşulları Tablo 14'de verilmiştir. Yüksek organik içeriğe sahip sığır gübresi ve tavuk gübresi için tüm model setleri altındaki koşullarda, düşük organik içeriğe sahip sığır gübresi için set 1 koşulları altında modelleme gerçekleştirilmiştir.

Tablo 14. Modelleme Koşulları

Model Setleri	Sıcaklık (°C)	OYH (kg.UKM/m ³ .g)
Set 1	35	2
Set 2	35	1.5
Set 3	35	1
Set 4	30	2
Set 5	30	1.5
Set 6	30	1
Set 7	25	2
Set 8	25	1.5
Set 9	25	1

5.1. Büyükbaş Hayvan Gübresinden (Yüksek Organik İçerikli) Biyogaz Üretiminin Modellenmesi

Büyükbaş hayvan gübresini (sığır atığı) substrat olarak kullanan reaktörün modellemesi yapılmış ve reaktördeki biyogaz üretim miktarı, biyogaz içeriği, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi ve reaktör içindeki pH değeri çıktıları elde edilmiştir. Bu sonuçlara ait grafikler ilerleyen bölümlerde verilmektedir. Bu bölümde modellemesi yapılan atık substrat A olarak isimlendirilmiştir.

5.1.1. Substrat A Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Reaktör içindeki gaz akış dengesi, start-up süresi olan 50. Günden itibaren kararlı duruma geçmektedir. Çalışmada kurulan modelde simülasyon başlangıcında reaktör içinde hiçbir gaz olmadığı ve reaktör içindeki pH düzeyinin başlangıç değerinin 12 olduğu varsayılmıştır.

Reaktör içindeki pH düzeyi üzerinde yapılan bu varsayım ile simülasyon başlangıcında reaktör içindeki pH düzeyinin, modelde matematiksel olarak negatif olması engellenmektedir.

Tablo 15. Substrat A Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	2121 m ³	
Karbondioksit Miktarı	530 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	111 Nm ³	5
Metan Gazı Miktarı	1479 Nm ³	70
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.31 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2173 NL	
pH Düzeti	7.296	

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü üzere kararlı durumda 35 °C sıcaklık altında ve 2 OYH' de reaktörde 2121 m³ biyogaz üretilmektedir. Biyogazın metan içeriği % 70' dir ve reaktöre giren 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.31 NL (Normal Litre)' ve metan üretimi 0.2173 NL' dir. Normak vd. (2012) çalışmasında bu substrat için yapılan deneysel çalışmada 1 gram UKM başına metan üretimi yukarıda belirtilen sıcaklık koşulu için 0.238 +/- 0.042 NL olarak verilmiş ve model çalışmasında bulunan 1 gram UKM başına metan üretimi bu sınırlar içerisinde tatmin edici bulunmaktadır. Reaktör içindeki pH düzeyi 7.296'dir ve bu düzey metan oluşum bakterilerinin faaliyetlerini devam ettirmesi için gereken optimal sınırlar (7-8) içerisinde yer almaktadır.

5.1.2. Substrat A Set 2 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 16. Substrat A Set 2 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1656 m ³	
Karbondioksit Miktarı	414 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	88 Nm ³	5
Metan Gazı Miktarı	1154 Nm ³	70
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.323 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2263 NL	
pH Düzeti	7.332	

Modelleme çalışması 35 °C sıcaklıkta ve 1.5 OYH kg.UKM/m³.g’ de olduğunda toplam biyogaz üretimi 1656 m³ olmaktadır. Açığa çıkan biyogazın metan içeriği % 70 olduğu gözükmektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.323 NL, metan üretimi 0.2263 NL’ dir ve pH düzeyi 7.332 olarak metan oluşum organizmalarını için istenen optimum aralıktadır. Modelleme çalışması OYH 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma göre biyogaz metan içeriğinin azaldığı görülmektedir. Ancak oransal olarak toplam biyogaz üretimi arttığı için 1 gram UKM başına metan üretimi artmıştır. Model sonuçlarına göre metan verimi göz önüne alındığında 1.5 kg.UKM/m³.g OYH, 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma göre daha uygun olmaktadır.

5.1.3. Substrat A Set 3 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 17. Substrat A Set 3 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1157 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	287 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	64.63 Nm ³	5
Metan Gazı Miktarı	805.6 Nm ³	70
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.339 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2373 NL	
pH Düzeti	7.374	

Modelleme çalışması 35 °C sıcaklık altında ve 1 kg.UKM/m³.g OYH’ de yapıldığında kararlı durumda günlük 1157 m³ biyogaz üretilmekte ve üretilen bu biyogazın metan içeriği %70 olmaktadır. Biyogazın metan içeriği 1 kg.UKM/m³.g ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH’ dekiyle aynı olmaktadır. 35 °C sıcaklık altında 1, 1,5 ve 1,5 kg.UKM/m³.g OYH’ lerinde üretilen biyogazın metan içeriği % 70 olarak saptanmıştır. Bu OYH’ de 1 gram UKM başına 0.2373 NL metan elde edilmektedir. 1 gram UKM başına metan verimi göz önüne alındığında en uygun OYH 1 kg.UKM/m³.g olmaktadır. Bu yüksek metan veriminin sebebi oransal olarak reaktör içinde daha fazla biyogaz üretilmesinden kaynaklanmaktadır. Reaktör içindeki pH düzeyi 7.374’ dür. Bu düzey metan oluşum bakterileri için daha uygun seviye aralığında bulunmaktadır. Yüksek Üretilen biyogaz miktarı artmakla beraber yüksek OYH’ lerde sistem verimi düşmektedir.

Bununla birlikte büyükbaş hayvan gübresinin substrat olarak kullanıldığı reaktör 30 °C sıcaklık koşulu atında yapılmış ve reaktördeki biyogaz üretim miktarı, biyogaz içeriği, 1

gram UKM başına metan üretimi ve reaktör içindeki pH değeri çıktıları elde edilmiştir. Çalışmanın bu kısmında gerçekleştirilen modellemenin amacı reaktörün işletme sıcaklığının düşürülmesi durumunda veriminin incelenmesidir. Bu incelemeye ek olarak OYH 1, 1.5 ve 2 kg.UKM/m³.g seçilerek OYH' nin verim üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir.

5.1.4. Substrat A Set 4 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 18. Substrat A Set 4 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1978 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	513,15 Nm ³	26
Su buharı Miktarı	74.84 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	1390 Nm ³	70
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.292 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2049 NL	
pH Düzeyi	7.29	

Modelleme çalışması 30 °C sıcaklık altında ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1978 m³ biyogaz üretilmektedir. Aynı OYH' de 35 °C sıcaklık için modelleme çalışmasında elde edilen değer ile (2121 m³) karşılaştırıldığında önemli ölçüde bir düşüş gözlemlenmektedir. Biyogaz içindeki metan oranının % 70 olduğu görülmektedir. 35 °C sıcaklık altında yapılan modelleme çalışmasındaki değer ile karşılaştırıldığında (% 70) 30 °C sıcaklık altında biyogazın içerdiği metan içeriğinin yüzdesinin değişmediği görülmektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretiminin 0.292 NL ve metan üretimi 0.2049 NL olarak görülmektedir ve bu değer beklenildiği gibi 30 °C sıcaklıktaki 1 gram UKM başına biyogaz üretimi (0.31 NL) ve metan üretimi değerinden (0.2173 NL) daha düşüktür. Bu azalma reaktör içerisindeki mikroorganizmaların düşük sıcaklıklarda faaliyetlerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Modelde bu işlev kaybı sıcaklık katsayılarının modele dâhil edilmesi ve modelin orijinal halinde sabit bir katsayı ile ifade edilen gaz transfer katsayısının sıcaklığa bağlı fonksiyon ile ifade edilmesi ise sağlanmaktadır. Bunun sonucunda elde edilen biyogaz üretiminin % 6.74 düştüğü görülmektedir. Bu koşullar altında reaktör içinde, kararlı durumdaki pH düzeyi 7.29 olarak uygun aralıkta düzeyde seyretmektedir.

5.1.5. Substrat A Set 5 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 19. Substrat A Set 5 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1555 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	391.57 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	68.42 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	1095 Nm ³	71
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.307 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2153 NL	
pH Düzeyi	7.275	

Modelleme çalışması 30 °C sıcaklık altında ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1555 m³ biyogaz üretilmektedir. Beklenildiği üzere üretilen toplam biyogaz miktarı 35 °C sıcaklıkta üretilen gaz miktarına kıyasla % 9.3 daha azdır. Biyogazın içerdiği metan oranının % 71 olduğu görülmektedir. Bu artışın sebebi 30 °C sıcaklıkta yüzdesel olarak daha az miktarda su buharı bulunmasıdır. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.307 NL ve metan üretimi 0.2153 NL olmaktadır. Bu değer 35 °C sıcaklıktaki ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH 1 gram UKM başına biyogaz (0.323 NL) ve metan (0.2263 NL) üretimine kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi 30 °C Sıcaklık ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' deki değerler ile (sırasıyla 0.292 ve 0.2049 NL) kıyaslandığında arttığı gözlemlenmektedir. 1 gram UKM başına biyogaz ve metan verimi dikkate alındığında OYH' nin 1.5 kg.UKM/m³.g olması daha yüksek metan üretimine yol açmaktadır. Reaktör içindeki kararlı durumdaki pH düzeyi 7.275 olarak mikroorganizmaların faaliyet gösterebileceği uygun aralıkta olmaktadır.

5.1.6. Substrat A Set 6 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 20. Substrat A Set 6 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1095 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	275 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	46.23 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	773,68 Nm ³	71
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.325 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2279 NL	
pH Düzeyi	7.326	

Modelleme çalışması 30 °C sıcaklık altında ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1095 m³ biyogaz üretilmektedir. Üretilen biyogazın % 71 metan içermektedir. 30 °C sıcaklıkta OYH 1.5 kg.UKM/m³.g olduğu duruma (% 71) göre biyogazın içerdiği metan oranında değişim gözlemlenmemektedir. Reaktörde 30 °C sıcaklık altında ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' de oransal olarak daha fazla biyogaz üretilmektedir. Bu yüzden için 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin OYH 1.5 kg.UKM/m³.g olduğu duruma göre sırasıyla 0.307 NL' den 0.325 NL' ye ve 0.2153 NL' den 0.2279 NL' ye yükselmiştir.

5.1.7. Substrat A Set 7 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 20. Substrat A Set 7 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1801 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	463 Nm ³	26
Su buharı Miktarı	60,8 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	1277 Nm ³	71
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.265 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.1885 NL	
pH Düzeyi	7.127	

Modelleme çalışması 25 °C sıcaklık altında ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1801 m³ biyogaz üretilmektedir. Biyogaz miktarı 2 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C ve 30 °C sıcaklık altındaki biyogaz üretim değerlerine kıyasla, sırasıyla % 15.08 ve % 8.94 düşük olmaktadır. Üretilen biyogazın metan içeriği % 71 olarak

bulunmuştur. Reaktör içindeki pH değeri üç sıcaklık koşulu altında; 25 °C sıcaklıkta en düşük olduğu düzeyde seyretmekte, bu durumun mezofilik bakteriler için en uygun olan 35-37 °C sıcaklık aralığından uzaklaşılmasından ve düşük sıcaklık değerlerinde pH düzeyindeki azalmadan kaynaklanmaktadır.

5.1.8. Substrat A Set 8 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 21. Substrat A Set 8 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1432 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	364.91 Nm ³	26
Su buharı Miktarı	45,33 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	1021 Nm ³	71
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.282 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2006 NL	
pH Düzeyi	7.191	

Modelleme çalışması 25 °C sıcaklık altında ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1432 m³ biyogaz üretilmektedir. Biyogazın metan içeriği yaklaşık % 71 olmaktadır. Biyogaz metan içeriği 25 °C sıcaklıkta OYH' nin 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma (% 71) göre değişim göstermemiştir. Analiz sonucunda 1 gram UKM başına biyogaz üretiminin 0.282 NL ve metan üretiminin 0.2006 NL olduğu görülmektedir. Beklenildiği gibi bu değer 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C (0.2263 NL) ve 30 °C (0.2153 NL) sıcaklıklardaki değerden daha az olmaktadır. Ayrıca bu analiz çalışmasındaki aynı sıcaklıkta ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' de elde edilen 1 gram UKM başına düşen metan üretiminin 0.1885 NL' den 0.2006 NL' e çıktığı gözlemlenmiştir. Biyogaz içerisindeki metan yüzdesi dikkate alındığında, 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de 25 °C sıcaklıkta daha yüksek olmaktadır. Reaktör içindeki pH değeri kararlı durumda, metanojenlerin faaliyetlerini sürdürebilecekleri bir düzeydedir. Buna ek olarak pH değeri yüksek sıcaklıklardaki değerlere göre düşüş göstermektedir. Bu azalma asit üreten mikroorganizmaları tarafından faydalı bir durum olmaktadır. Ancak metanojenlerin işlevlerini engellemektedir. Bu yüzden pH düzeyi istenilen aralıkta olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklardaki elde edilen metan verimine bu sıcaklıkta ulaşamamıştır.

5.1.9. Substrat A Set 9 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 22. Substrat A Set 9 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1022 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	256 Nm ³	25
Su buharı Miktarı	35,15 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	730,5 Nm ³	72
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.299 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2153 NL	
pH Düzeyi	7.261	

Modelleme çalışması 25 °C sıcaklık altında ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında kararlı durumda günlük 1022 m³ biyogaz üretilmektedir. Biyogazın metan içeriği % 72 olarak bulunmuştur. Biyogazın metan içeriği 1 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C (% 70) ve 30 °C (% 71) sıcaklıklardaki değerlere göre çok az oranda artış göstermektedir. Benzer şekilde biyogazın metan içeriği 25 °C sıcaklık altında OYH 1 kg.UKM/m³.g iken, 2 kg.UKM/m³.g (% 71) ve 1.5 kg.UKM/m³.g (% 71) OYH' lere göre çok az artış sergilemektedir. 25 °C sıcaklık altında ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' de 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi sırasıyla 0.299 NL ve 0.2153 NL olmaktadır. Bu değer 1 kg.UKM/m³.g OYH için 35 °C (0.2373 NL) ve 30 °C (0.2279 NL) sıcaklık değerlerine kıyasla daha düşüktür. Ek olarak 1 gram UKM başına biyogaz ve metan verimi aynı sıcaklık koşulu altında 2 kg.UKM/m³.g (0.1885 NL) ve 1.5 kg.UKM/m³.g (0.2006 NL) OYH' lere göre artış göstermektedir. Beklenildiği gibi düşük sıcaklıklarda biyogaz ve metan üretiminde azalma görülmektedir. Reaktör içindeki pH düzeyi kararlı durumda 7.261 seviyesinde olmaktadır. 25 °C sıcaklıkta, 2 kg.UKM/m³.g (7.127) ve 1.5 kg.UKM/m³.g (7.191) OYH' lerdeki pH değerleri ile karşılaştırıldığında pH değeri, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi verilerinden anlaşılacağı üzere, metan oluşum bakterileri için daha uygun düzeyde bulunmaktadır. Mevcut işletme koşullarında kararlı durumdaki pH düzeyi, 35 °C (7.374) ve 30 °C (7.326) sıcaklık koşullarındaki pH değerleri ile kıyaslandığında daha düşük bir değer olarak bulunmuştur. Bu da reaktör içindeki 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin düşmesine neden olmaktadır.

5.2. Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretiminin Modellenmesi

Bu bölümde tavuk gübresinin substrat olarak kullanılması ile biyogaz üretiminin modellenmesi yapılmış ve reaktördeki biyogaz üretim miktarı, biyogaz içeriği, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi ve reaktör içindeki pH değeri çıktıları elde edilmiştir. Bozunabilir organik içeriği diğer iki büyükbaş hayvan gübresine göre daha yüksek olan bu substrat ile aynı işletme koşullarında yapılan modelleme çalışmasında çıkan 1 gram UKM başına biyogaz, metan üretiminin ve biyogaz miktarının daha yüksek olacağı beklenmektedir. Bu sonuçlara ait tablolar ilerleyen bölümlerde verilmektedir. Bu bölümde modellenmesi yapılan atık Substrat B olarak isimlendirilmiştir.

5.2.1 Substrat B Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 23. Substrat B Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	2605 Nm ³	
Karbondiyoksit Miktarı	694 Nm ³	27
Su buharı Miktarı	141.86 Nm ³	5
Metan Gazı Miktarı	1768.4 Nm ³	68
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.383 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2605 NL	
pH Düzeyi	7.609	

Mevcut işletme koşullarında kararlı durumda 2605 m³ biyogaz üretilmektedir. Biyogazın metan içeriği % 68 olmaktadır. 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi sırasıyla 0.383 NL ve 0.2605 NL' dir. Reaktör içindeki pH düzeyi 7.609 ile düşük asidik özelliğe sahiptir ve bu düzey metan oluşum bakterilerinin faaliyet gösterebileceği optimal aralıktadır.

5.2.2. Substrat B Set 2 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 24. Substrat B Set 2 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	2003 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	526 Nm ³	26
Su buharı Miktarı	117.08 Nm ³	6
Metan Gazı Miktarı	1359.6 Nm ³	68
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.392 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2678 NL	
pH Düzeyi	7.626	

Modelleme çalışması 35 °C Sıcaklık ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH altında yapıldığında biyogaz üretim miktarı 2003 m³ olmaktadır. Üretilen biyogazın metan içeriği % 68 olmaktadır. 35 °C sıcaklıkta ve OYH' nin 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma göre metan içeriğinin değişmediği gözlemlenmektedir. Kararlı durumda 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.392 NL ve metan üretimi 0.2678 NL' dir. 1 gram UKM başına metan üretimi 35 °C sıcaklıkta OYH 2 kg.UKM/m³.g (0.2605 NL) olduğu duruma kıyasla artış göstermektedir. Reaktör içindeki pH değeri 7.626 olmaktadır ve bu değer metan oluşum bakterilerinin işlev göstermesi için uygun seviyede olduğu görülmektedir. 1 gram UKM başına metan üretimi göz önüne alındığında 35 °C sıcaklık altında OYH' nin 1.5 kg.UKM/m³.g olduğu durum daha avantajlı olmaktadır. Ancak OYH 1.5 kg.UKM/m³.g iken üretilen toplam biyogaz miktarı düşüş göstermektedir.

5.2.3. Substrat B Set 3 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 25. Substrat B Set 3 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1373 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	359.3 Nm ³	26
Su buharı Miktarı	76.16 Nm ³	6
Metan Gazı Miktarı	937.54 Nm ³	68
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.407 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.277 NL	
pH Düzeyi	7.642	

Modelleme çalışması 35 °C sıcaklıkta ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında, kararlı durumda üretilen biyogaz miktarı 1373m³ olmaktadır. Üretilen biyogazın metan içeriği ise % 68'dur. Mevcut sıcaklıkta ve OYH 2 kg.UKM/m³.g (% 68), 1.5 kg.UKM/m³.g (% 68) olduğu durumlara göre biyogazın metan içeriği değişim göstermemektedir. Sistemde 1 gram UKM başına düşen biyogaz üretimi 0.407 NL, metan üretimi 0.277 NL olmaktadır. 35 °C sıcaklık ve 1.5 kg.UKM/m³.g (0.2678 NL) ve 2 kg.UKM/m³.g (0.2605 NL) OYH' lerindeki 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimlerine kıyasla en yüksek üretim bu koşul altında elde edilmektedir. Mevcut koşullarda, biyogaz içindeki metan içeriği yüksek OYH' ler ile aynı olmaktadır. 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin 35 °C sıcaklıkta ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' de en yüksek çıkması; reaktör içinde mikroorganizmaların yüksek OYH' lerdekine göre daha verimli bir biçimde faaliyet göstermesinden kaynaklanmaktadır. Reaktör içinde kararlı durumda pH değeri 7.642 olarak bulunmuştur. Bu pH değeri 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g (7.609) ve 1.5 kg.UKM/m³.g (7.626) OYH' lerindeki pH değerleri ile karşılaştırıldığında yüksek düzeyde bulunmaktadır.

5.2.4. Substrat B Set 4 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 26. Substrat B Set 4 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	2475 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	678.94 Nm ³	28
Su buharı Miktarı	106.55 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	1689.5 Nm ³	68
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.366 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2493 NL	
pH Düzeyi	7.565	

Modelleme çalışması 30 °C sıcaklık ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' de yapıldığında üretilen gaz miktarı 2475 m³ olmaktadır. Modellemenin 2 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C sıcaklık altında yapıldığı duruma göre biyogaz üretimi 2605 m³' den 2475 m³' e düşerek % 5 azalma göstermektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.366 NL ve metan üretimi 0.2493 NL olmaktadır. 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g OYH' de bu değer 0.2605 NL olarak % 4.29 azalma göstermektedir. Reaktör içindeki pH değeri 7.565' dir. Sıcaklık 35 °C (7.609) olduğu duruma göre pH değeri azalma göstermiştir, bu düşüş reaktör içindeki mikroorganizmaların faaliyetlerini sıcaklık 35 °C olduğu duruma göre engelleyici rol oynamıştır.

5.2.5. Substrat B Set 5 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 27. Substrat B Set 5 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1964 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	526.31 Nm ³	27
Su buharı Miktarı	86.88 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	1350.8 Nm ³	69
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.384 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2653 NL	
pH Düzeyi	7.585	

Kararlı durumda üretilen biyogaz miktarı 1964 m³ olmaktadır. Üretilen biyogaz miktarı aynı sıcaklık altında OYH 2 kg.UKM/m³.g (2475 m³) olduğu duruma göre % 20.6 azalma göstermektedir. Biyogaz içeriği 2 kg.UKM/m³.g OYH'ında ve 35 °C sıcaklık altında olduğu duruma (% 70) göre % 2 gibi çok düşük oranda bir azalma sergilemektedir. Analiz sonucunda 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0,384 NL ve metan üretimi 0.2653 NL bulunmuştur. Bu değerler 35 °C sıcaklık altında 1.5 kg.UKM/m³.g OYH'ında bulunan 1 gram UKM başına biyogaz üretimi ve metan üretimine göre artış göstermektedir. 30 °C sıcaklıkta OYH 1.5 kg.UKM/m³.g elde edilen 1 gram UKM başına metan üretimi değerinde, 30 °C sıcaklıkta OYH 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma (0.2493 NL) göre % 6.03 artış gözlemlenmektedir. Kararlı durumda reaktör içindeki pH değeri 7.585 düzeyinde seyretmektedir. Bu düzey reaktör içerisindeki mikroorganizmaların faaliyet gösterebilmesi için gereken optimal pH aralığındadır.

5.2.6. Substrat B Set 6 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 28. Substrat B Set 6 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1317 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	350 Nm ³	27
Su buharı Miktarı	59.1 Nm ³	4
Metan Gazı Miktarı	907.9 Nm ³	69
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.389 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2686 NL	
pH Düzeyi	7.608	

Kararlı durumda üretilen biyogaz miktarı 1317 m³ olmaktadır ve üretilen biyogazın metan yüzdesi % 69' dir. Mevcut sıcaklıkta sırasıyla 2 kg.UKM/m³.g (2475 m³) ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH (1964 m³)' larındaki biyogaz üretime değerlerine kıyasla % 46.78 ve % 32.94 düşüş göstermektedir. Ek olarak biyogazın metan içeriği mevcut sıcaklık ve sırasıyla 2 kg.UKM/m³.g (% 68) ve 1.5 (% 69) OYH' lerindeki yüzdelerine göre önemli değişim göstermemiştir. Biyogaz üretim miktarı 1 kg.UKM/m³.g OYH' de ve 35 °C sıcaklık (1373 m³) altındaki üretimle kıyaslandığında % 4.07 oranında düşüş sergilemektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0,389 NL ve metan üretimi 0.2686 NL olmaktadır. 1 gram UKM başına metan üretimi 35 °C sıcaklık ve OYH 1 kg.UKM/m³.g (0.277 NL) olduğu duruma göre % 3.03 azalma göstermektedir. Ek olarak 1 gram UKM başına metan üretimi 30 °C sıcaklık ve OYH 2 kg.UKM/m³.g (0.2493 NL) ve 1.5 kg/mm³ (0.2653 NL) olduğu durumlara göre sırasıyla % 11 ve % 4.4 artış göstermektedir. 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi temel alınır en yüksek değerler 1 kg.UKM/m³.g OYH' de elde edilmektedir. Reaktör içindeki pH değeri 7.608' dir. Mevcut sıcaklık ve OYH 2 (7.565) ve 1.5 (7.585) olduğu durumlara göre pH değeri artış göstermektedir. 30 °C sıcaklık ve OYH 1 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C sıcaklık altında pH değerine kıyasla düşüş göstermektedir.

5.2.7. Substrat B Set 7 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 29. Substrat B Set 7 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	2332 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	653 Nm ³	28
Su buharı Miktarı	77.62 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	1600.87 Nm ³	69
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.341 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2355 NL	
pH Düzeyi	7.512	

Modelleme çalışması 25°C Sıcaklıkta ve 2 kg.UKM/m³.g OYH' nda yapıldığında üretilen gaz miktarı 2332 m³ olmaktadır. Üretilen biyogaz miktarı mevcut OYH' nda sırasıyla 35 °C (2605 m³) ve 30 °C (2475 m³) sıcaklık değerlerindeki biyogaz üretim miktarları ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 10.47 ve 5.77 düşüş sergilemektedir. Metan içeriği 2 kg.UKM/m³.g OYH' nda, 35 °C (% 68) ve 30 °C (% 69) sıcaklık altındaki metan

içeriklerine kıyasla önemli ölçüde değişim göstermemektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0,341 NL ve metan üretimi 0.2355 NL olmaktadır. Bu değer 2 kg.UKM/m³.g OYH' ında 35 °C (0.2605 NL) ve 30 °C (0.2493 NL) sıcaklık altındaki metan verimlerine kıyasla sırasıyla % 9.59 ve % 5.53 düşüş göstermektedir. Reaktör içindeki pH düzeyi kararlı durumda 7.512 değerinde bulunmaktadır.

5.2.8. Substrat B Set 8 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 30. Substrat B Set 8 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1818 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	498.25 Nm ³	28
Su buharı Miktarı	60.1 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	1259.65 Nm ³	69
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.358 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2476 NL	
pH Düzeyi	7.541	

Modelleme çalışması 25°C sıcaklıkta ve 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' ında yapıldığında üretilen toplam biyogaz miktarı 1818 m³ olmaktadır. Modelleme çalışması mevcut OYH' ında 35 °C (2003 m³) ve 30 °C (1964 m³) sıcaklık altında yapıldığı durumlara göre sırasıyla % 9.23 ve % 7.43 azalış göstermektedir. Üretilen biyogazın metan içeriği % 66. 43 olmaktadır. Metan içeriği 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' ında 35°C (% 68) ve 30°C (69) sıcaklık koşullarındaki metan içeriği değerlerine kıyasla önemli bir farklılık göstermemektedir. Ek olarak biyogazın metan oranı 25 °C sıcaklıkta ve OYH' ı (%69) 2 kg.UKM/m³.g olduğu duruma kıyasla metan içeriği değişmemektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0,358 NL ve metan üretimi 0.2476 NL olmaktadır. 1 gram UKM başına metan üretimi 1.5 kg.UKM/m³.g OYH' ında 35°C (0.2678 NL) ve 30°C (0.2653 NL) sıcaklık koşullarındaki 1 gram UKM başına metan üretimi değerlerine kıyasla sırasıyla % 7.54 ve % 6.67 düşüş göstermektedir. Ek olarak 1 gram UKM başına metan üretimi 25°C sıcaklık ve OYH 2 kg.UKM/m³.g (0.2355 NL) olduğu durumla karşılaştırıldığında % 5.13 artış sergilemektedir. Reaktör içindeki pH düzeyi kararlı durumda 7.541 olmaktadır.

5.2.9. Substrat B Set 9 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 31. Substrat B Set 9 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	1260 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	336.85 Nm ³	27
Su buharı Miktarı	44.2 Nm ³	3
Metan Gazı Miktarı	878.95 Nm ³	70
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.37 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.2596 NL	
pH Düzeyi	7.5654	

Modelleme çalışması 25°C sıcaklıkta ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' ında yapıldığında toplam 1260 m³ biyogaz açığa çıkmaktadır. Üretilen biyogaz miktarı OYH' i 1 kg.UKM/m³.g ve sıcaklığın 35°C (1373 m³), 30°C (1317 m³) olduğu durumlara kıyasla sırasıyla % 8. 23 ve % 4.32 azalma göstermektedir Üretilen biyogazın metan içeriği % 70 olmaktadır. Metan yüzdesi OYH 1 kg.UKM/m³.g ve sıcaklık 35°C (% 68), 30°C (% 69) olduğu durumlara kıyasla ve 25°C sıcaklıkta OYH' leri 2 kg.UKM/m³.g (% 69) ve 1.5 kg.UKM/m³.g (% 69) olduğu durumlara göre yüzdesel olarak çok fark göstermemektedir. 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0.37 NL ve metan üretimi 0.2596 NL olmaktadır. Bu değer OYH' ı 1 kg.UKM/m³.g ve sıcaklığın 35°C (0.277 NL), 30°C (0.2686 NL) olduğu durumlar ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 6.28 ve % 3.35 azalmaktadır. Ek olarak 1 gram UKM başına metan üretimi 25°C sıcaklık altında ve OYH 2 (0.2355 NL) ve 1 (0.2476) olduğu durumlara göre kıyasla sırasıyla % 10.23 ve % 4.84 artış sergilemektedir. Mevcut sıcaklık için 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi dikkate alındığında OYH 1 kg.UKM/m³.g olduğu durum en avantajlı seçenek olmaktadır. Reaktör içindeki pH kararlı durumda 7.565 düzeyinde seyretmektedir.

5.3. Düşük Organik İçeriğe Sahip Büyük Baş Hayvan Gübresinin Modellenmesi

Modellemesi yapılan 3. substrat sığır gübresidir ve modellemesi yapılan ilk substrat olan büyükbaş gübresine göre düşük organik içeriğe sahiptir. Düşük organik içeriğe sahip büyükbaş hayvan gübresinin modelleme çalışması yalnız işletme koşulları 35°C sıcaklık ve OYH 2 kg.UKM/m³.g olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmasının amacı aynı tür atığın farklı organik içeriğe sahip olduğu durumda modelin nasıl cevap

vereceğini görmek ve biyogaz üretimi için substratın organik içeriğinin önemini vurgulamak için yapılmıştır. Modellemesi yapılan ilk yüksek organik içeriğe sahip olan büyükbaş gübresinin partiküler 70,482 kg_{KOI}/m³, tavuk gübresinin 120.17 kg_{KOI}/m³ ve bu bölümde modellenen büyükbaş hayvan gübresinin partiküler kısmı 55.07 kg_{KOI}/m³ kadardır. Bu büyükbaş hayvan gübresi diğer modellemesi yapılan gübrelere göre en düşük organik içeriğe sahiptir. Bu bölümde modellemesi yapılan atık Substrat C olarak isimlendirilmiştir.

5.3.1 Substrat C Set 1 Koşullarında Modelleme Çalışması Sonuçları

Tablo 32. Substrat C Set 1 Koşulları Altında Model Sonuçları

	Miktarı	Yüzdesi
Biyogaz Miktarı	605.3 Nm ³	
Karbondioksit Miktarı	336.85 Nm ³	31
Su buharı Miktarı	82.41 Nm ³	8
Metan Gazı Miktarı	312 Nm ³	61
1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	0.1466 NL	
1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	0.08944NL	
pH Düzeyi	7.167	

Modelleme çalışması sonucunda elde edilen biyogaz üretim miktarı 975.8 m³' dür. Aynı işletme koşullarında 1. atığın biyogaz üretim miktarıyla (2121 m³) kıyaslandığında elde edilen biyogaz miktarının % 54.03 daha az olduğu görülmektedir. Üretilen biyogazın metan içeriği % 61 olmaktadır. Biyogazın metan içeriği 1. substratın aynı koşullarında yapılan modelleme çalışmasındaki değere (% 65) göre daha az olmaktadır. Analiz sonucunda 1 gram UKM başına biyogaz üretimi 0,1466 NL ve metan üretimi 0.08944 NL elde edilmektedir. Bu değer aynı şartlar altında 1. substrat kullanılarak yapılan modelleme sonucu elde edilen 1 gram UKM başına metan üretimi değerinden (0.2173 NL) % 58.84 daha az olmaktadır.

Yukarıdaki farklı koşullarda yapılan modellemelerin sonuçları aşağıdaki Tablo 33' de bir araya getirilerek verilmiştir. Tablo 33' den görüldüğü üzere en fazla biyogaz üretim miktarı 2605 m³ değer ile 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g OYH' de tavuk gübresinden (Substrat B) elde edilmiştir. En düşük biyogaz miktarı ise 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g OYH' ında 975,8 m³ değer ile düşük organik içeriğe sahip büyükbaş gübresinden (Substrat C) elde edilmiştir. Tüm koşullar altında en yüksek biyogaz üretim değeri tavuk gübresinden elde edilmiştir. Bu durum beklenen gibi gerçekleşmiştir, çünkü kullanılan tavuk gübresinin organik içeriği diğer substratlara göre daha yüksektir. Biyogaz

üretimi düşük sıcaklıklarda düşüş göstermiştir. Bu durum mezofilik koşullarda mikroorganizmaların faaliyet gösterebildiği optimal sıcaklık aralığı 35-37 °C uzaklaşılmasından kaynaklanmaktadır. Biyogaz üretimi, beklenildiği gibi düşük OYH' lerde daha az gerçekleşmiştir, çünkü düşük OYH' lerde reaktör içine birim zamanda giren organik içerik miktarı daha az olmaktadır.

1 gram UKM başına en yüksek biyogaz ve metan üretimi 35 °C sıcaklık altında 1 kg.UKM/m³.g OYH' de tavuk gübresinden elde edilmiştir, bu değerler sırasıyla 0,407 NL ve 0,277 NL ' dir, 1 gram UKM başına metan ve biyogaz üretimi sıcaklık düşerken azalmaktadır. Ancak OYH' nin düştüğü durumda artış göstermektedir. Çalışmada tavuk gübresinden elde edilen 1 gram UKM başına en yüksek biyogaz üretimi miktarının Dalkılıc vd. çalışmasındaki elde edilen 0,500 NL' den düşük olması, bu çalışmada kullanılan tavuk gübresinin inert içeriğinin fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm sıcaklık koşullarında 1 gram UKM başına metan ve biyogaz üretimi en yüksek OYH 1 kg.UKM/m³.g olduğu durumda gözlemlenmiştir. Bu durum şu sebepten kaynaklanmaktadır; pH değeri OYH' nin arttığı durumda artmaktadır, pH değerindeki bu yükseliş metanojenlerin faaliyetlerini arttırmaktadır. Benzer şekilde Babae vd. çalışmasında da 1,4, 2 ve 2,75 kg.UKM/m³.g OYH' lerde bitkisel atıklar arıtılmış ve en yüksek biyogaz üretimi ve pH değeri yavaş OYH' de elde edilmiştir [37]. Ek olarak Dalkılıc vd. çalışmasında da OYH 2,17 kg.UKM/m³ iken OYH 1,9 kg/UKM olduğu duruma göre daha fazla biyogaz üretimi gerçekleştiği görülmüştür [38]. En düşük 1 gram UKM başına metan ve biyogaz üretimi sırasıyla 0,1466 NL ve 0,08944 NL değerler ile Substrat C' den 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g OYH' de elde edilmiştir, çünkü substrat C' nin organik içeriği diğer substratlara göre daha azdır.

Biyogazın metan yüzdesi en yüksek % 72 değer ile substrat B (yüksek organik içeriğe sahip büyükbaş gübresi) için 25 °C sıcaklık altında 1 OYH' de elde edilmiştir. En düşük metan yüzdesi substrat C için %61 değer ile 35 °C sıcaklık altında 2 kg.UKM/m³.g OYH' de elde edilmiştir. Biyogaz içerisindeki metan yüzdesi sıcaklık düşerken çok küçük bir artış göstermiştir. Bu durum düşük sıcaklıklarda daha yüksek metan içeriği elde edilen Arıkan vd. çalışmasında 22 °C sıcaklıkta biyogazın içerdiği metan yüzdesini % 67, 28 °C sıcaklık altında % 67 ve 35 °C sıcaklık altında % 66 bulmuştur [35]. Kestutis vd. çalışmasında sıcaklığın 52 °C' den 57 °C' e çıktığı durumda üretilen biyogazın metan içeriğinin % 59' dan % 56' ya düştüğü gözlemlenmiştir [37]. Bu çalışma dikkate alındığında sıcaklık düşerken biyogazın metan yüzdesinin çok düşük miktarlarda artması olası gözükmemektedir.

Tablo 33. Özet Tablo

Setler	Biyogaz Miktarı	Metan miktarı	Karbondiyoksit Miktarı	Su buharı Miktarı	Metan Yüzdesi	Karbondiyoksit Yüzdesi	Su buharı Yüzdesi	1 Gram UKM Başına Biyogaz Üretimi	1 Gram UKM Başına Metan Üretimi	pH Düzeyi	
Set 1	2121	1479	530	111	70	25	5	0,31	0,2173	7,296	Substrat A
Set 2	1656	1154	414	88,5	70	25	5	0,323	0,2263	7,332	
Set 3	1157	805,6	287	64,63	70	25	5	0,339	0,2373	7,374	
Set 4	1978	1390	513,15	74,84	70	26	4	0,292	0,2049	7,229	
Set 5	1555	1095	391,57	68,42	71	25	4	0,307	0,213	7,275	
Set 6	1095	773,68	275	46,23	71	25	4	0,325	0,2279	7,326	
Set 7	1801	1277	463	60,8	71	26	3	0,265	0,1885	7,127	
Set 8	1432	1021	364,91	45,33	71	26	3	0,282	0,2006	7,191	
Set 9	1022	730,5	256	35,15	72	25	3	0,299	0,2153	7,261	
Set 1	2605	1768,4	694	141,86	68	27	5	0,383	0,2605	7,609	Substrat B
Set 2	2003	1359,6	526	117,08	68	26	6	0,393	0,2678	7,626	
Set 3	1373	937,54	359,3	76,16	68	26	6	0,407	0,277	7,642	
Set 4	2475	1689,5	678,94	106,55	68	28	4	0,366	0,2493	7,565	
Set 5	1964	1350,8	526,31	86,88	69	27	4	0,384	0,2653	7,585	
Set 6	1317	907,9	350	59,1	69	27	4	0,389	0,2686	7,608	
Set 7	2332	1600,87	653	77,62	69	28	3	0,341	0,2355	7,512	
Set 8	1818	1259,65	498,25	60,1	69	28	3	0,358	0,2476	7,541	
Set 9	1260	878,95	336,85	44,2	70	27	3	0,37	0,2596	7,565	
Set 1	975,8	605,3	312	82,41	61	31	8	0,1466	0,08944	7,167	Substrat C
Birimler	Nm ³	Nm ³	Nm ³	Nm ³	%	%	%	NL	NL		

Çalışmada pH düzeyi sıcaklık artarken ve OYH' i artarken yükseliş göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretiminin düşmesinin sebebi pH düzeyindeki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. En düşük pH seviyesi substrat C için 2 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C sıcaklık altında 7,167 değeri ile elde edilmiştir. En yüksek pH değeri tavuk gübresinden 1 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C sıcaklık altında 7,642 düzeyinde elde edilmiştir. Tavuk gübresiyile (Substrat B) yapılan analiz sonucunda elde edilen pH tük koşullarda diğer gübrelerden (Substrat A ve C) yüksek çıkmaktadır. Bu durum metanojen bakterileri daha iyi faaliyet göstermelerine sebep olarak tavuk gübresinden diğer analizi yapılan gübrelere göre aynı koşullarda daha fazla biyogaz ve metan elde edilmesini

sağlamaktadır. Analizi yapılan büyükbaş hayvan gübrelere düşük pH düzeyinin metanojenler üzerinde inhibisyon etkisi görülmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında tavuk gübresindeki pH düzeyinin yüksek olması tavuk gübresinin analizi yapılan diğer gübrelere göre daha yüksek protein içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek protein içeriği pH düzeyinin 8.5 seviyelerine çıkararak metanojenlerin inhibisyonuna sebep olabilir bu yüzden kontrol altında tutulması gerektiği düşünülmektedir.

Modelde kinetik parametreler üzerinde modelin sıcaklık değişimlerine daha iyi cevap verebilmesi için Bergland vd. önerilen değişiklik yapılmıştır. Bu değişiklikler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Sıcaklık 2 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C' den 30 °C ve 25 °C düştüğünde yüksek organik içerikli büyükbaş gübresinden (substrat A) elde edilen biyogaz miktarı 2121 m³' den sırasıyla 1978 m³ ve 1801 m³' e düşmektedir. Yüzdesel olarak sırasıyla 6,06 ve 15,08 azalmaktadır. Tavuk gübresi (Substrat B) ile üretilen biyogaz miktarı sıcaklığın, 2 kg.UKM/m³.g OYH' de 35 °C' den 30 °C ve 25 °C düştüğü durumda 2605 m³' den sırasıyla 2475 m³ ve 2332 m³' e düşmektedir. Yüzdesel olarak sırasıyla 4.04 ve 10.47 azalmaktadır. Bergland vd.' nin çalışmasında yapılan deneysel çalışmada biyogaz miktarının sıcaklığın 35 °C' den 30 °C ve 25 °C' ye düştüğü durumda sırasıyla % 8 ve 23 azaldığı görülmektedir. Bu sonuç temel alınarak Bergland vd. tarafından önerilen katsayıların yüksek organik içerikli sığır gübresi için yaklaşık sonuçlar verdiği, ancak tavuk gübresi için iyi sonuçlar vermediği düşünülmektedir.

5.4. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayıların Üzerinde Hassasiyet Analizi Sonuçları

Çalışmada uyarlanan katsayılar ve parametrelerin incelenen model çıktıları üzerinde etkilerini incelemek bu parametre ve katsayılara hassasiyet analizi uygulanmıştır. Tablo 33' de bu katsayı ve parametrelerin biyogaz üretim, Tablo 34' de metan gazı üretimi üzerine ve Tablo 35' de karbondioksit gazı üretim değerleri üzerine etkisinin sonuçlarını barındıran tablolar verilmiştir.

Tablo 34. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayılarının Biyogaz Üretimi Üzerine Etkisi

Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi	Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi
Sva	2065	2605	2065	m ³	khyd,ch	2434	2605	2642	m ³
Sbu	2605	2605	2065	m ³	khyd,pr	2505	2605	2626	m ³
Spro	2605	2605	2065	m ³	khyd,li	2572	2605	2617	m ³
Xpr	1996	2605	4958	m ³	XI	2605	2605	2605	m ³
Xli	2382	2605	3480	m ³	Sac	2605	2605	2605	m ³
Sin	2591	2605	2608	m ³	Scat	2362	2605	2666	m ³
Xsu	2605	2605	2605	m ³	km,c4	2605	2605	2605	m ³
Xaa	2605	2605	2065	m ³	KS,C4	2605	2605	2605	m ³
Xfa	2605	2605	2605	m ³	Km,pro	2605	2605	2605	m ³
Xc4	2604	2605	2606	m ³	KS,pro	2605	2605	2605	m ³
Xpro	2605	2605	2605	m ³	Km,ac	2597	2605	2605	m ³
Xac	2605	2605	2605	m ³	KS,H2	2605	2605	2605	m ³
Xh2	2605	2605	2605	m ³	Xch	1479	2605	6505	m ³

Tablo 35. Değiştirilen Model Parametre ve Katsayılarının Metan Gazı Üretimi Üzerine Etkisi

Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi	Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi
Sva	1772	1772	1772	m ³	khyd,ch	1659	1772	1796	m ³
Sbu	1772	1772	1772	m ³	khyd,pr	1726	1772	1782	m ³
Spro	1772	1772	1772	m ³	khyd,li	1703	1772	1787	m ³
Xpr	1467	1772	2437	m ³	XI	1772	1772	1772	m ³
Xli	1772	1772	1772	m ³	Sac	1772	1772	1772	m ³
Sin	1772	1772	1772	m ³	Scat	1770	1772	1777	m ³
Xsu	1772	1772	1772	m ³	km,c4	1770	1772	1772	m ³
Xaa	1772	1772	1772	m ³	KS,C4	1771	1772	1772	m ³
Xfa	1772	1772	1772	m ³	Km,pro	1467	1772	1775	m ³
Xc4	1768	1772	1784	m ³	KS,pro	1759	1772	1772	m ³
Xpro	1772	1772	1772	m ³	Km,ac	1610	1772	1773	m ³
Xac	1772	1772	1772	m ³	KS,H2	1767	1772	1772	m ³
Xh2	1772	1772	1772	m ³	Xch	1030	1772	4356	m ³

Tablo 36. Değiştirilen Model parametre ve Katsayılarının Karbondioksit Gazı Üretimi Üzerine Etkisi

Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi	Parametreler	% 20	%100	%400	Birimi
Sva	696.4	696.4	696.4	m ³	khyd,ch	646.9	696.4	707.1	m ³
Sbu	696.4	696.4	696.4	m ³	khyd,pr	647.9	696.4	707	m ³
Spro	696.4	696.4	696.4	m ³	khyd,li	691.3	696.4	718.2	m ³
Xpr	384.4	696.4	2305	m ³	XI	696.4	696.4	696.4	m ³
Xli	696.4	696.4	696.4	m ³	Sac	696.4	696.4	696.4	m ³
Sin	640.2	696.4	709.7	m ³	Scat	460.9	696.4	760.4	m ³
Xsu	696.4	696.4	696.4	m ³	km,c4	696	696.4	697.4	m ³
Xaa	696.4	696.4	696.4	m ³	KS,C4	696.2	696.4	696.8	m ³
Xfa	696.4	696.4	696.4	m ³	Km,pro	1007	696.4	693.1	m ³
Xc4	688.5	696.4	698.8	m ³	KS,pro	695.5	696.4	708.8	m ³
Xpro	696.4	696.4	696.4	m ³	Km,ac	848.2	696.4	695	m ³
Xac	696.4	696.4	696.4	m ³	KS,H2	695.6	696.4	699.9	m ³
Xh2	696.4	696.4	696.4	m ³	Xch	369.4	696.4	1862	m ³

Analiz sonucunda substratın organik içeriği ifade eden X_{pr} (protein içeriği), X_{ch} (karbonhidrat içeriğini) ve X_{li} (lipit içeriği) model giriş parametrelerinin reaktör içinde üretilen biyogaz, metan ve karbondioksit gazlarının miktarları üzerinde, tahmin edildiği üzere çok önemli etkisi olduğu görülmüştür. Substratın kinetik özelliklerini ifade eden k_{hyd-ch} , k_{hyd-pr} ve k_{hyd-li} katsayıların üretilen biyogaz, metan ve karbondioksit gazı üzerine etkilerinin zayıf olduğu anlaşılmıştır. Reaktör içine giren sıvı katyonu temsil eden $Scat$ giriş parametresinin benzer X_{pr} , X_{ch} ve X_{li} parametrelerine kıyasla biyogaz, metan gazı ve karbondioksit gazı üretimine etkisinin zayıf olduğu görülmektedir. Bazı parametrelerinin biyogaz üretimi üzerine çok etkileri olmamasına rağmen, metan ve karbondioksit gazlarının üretimi üzerine etkisi vardır ve biyogazın miktarından çok, içeriği üzerine belirleyici etken olmaktadır. Bu parametreler şu şekildedir; $k_{m,pro}$ (propiyonat kullanan mikroorganizmaların maksimum alım hızı), $k_{m,ac}$ (asetat kullanan mikroorganizmaların maksimum alım hızı) ve bunlar biyogazın içeriği üzerinde kuvvetli röle sahiptirler. $Scat$ giriş parametresi metan gazı üretimi üzerinde çok etkili değildir, ancak karbondioksit gazı üzerinde etkili rol oynamaktadır bu yüzden biyogazın içeriğinde kuvvetli etkiye, üretilen biyogaz miktarında zayıf etkiye sahiptir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ADM1 modeli kullanılarak Matlab platformunda biyogaz reaktörünün modellenmesi yapılmıştır. Modelleme 3 ayrı substrat üzerinde farklı işletme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Modelleme yüksek organik içeriğe sahip büyükbaş hayvan gübresi ve tavuk gübresi için 35 °C, 30 °C ve 25 °C sıcaklıkta ve her sıcaklık için sırasıyla 2, 1.5 ve 1 kg.UKM/m³.g OYH' lerinde yapılmıştır. Düşük organik içeriğe sahip büyükbaş hayvan gübresi için yalnız 35 °C sıcaklıkta OYH 2 kg.UKM/m³.g olduğu durumda modelleme gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonucunda biyogaz üretim miktarı, biyogazın metan içeriği, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi ve reaktör içindeki pH düzeyi incelenmiştir ve bir sonraki paragraftaki sonuçlara varılmıştır.

Modellemesi yapılan substratlar için elde edilen biyogaz miktarı, biyogaz içeriği ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretim değerleri literatürde deneysel çalışmalarla elde edilen aralıklar içinde bulunmuştur. ADM1 modelinde gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için kullanılacak substratın karakterizasyonunun yapılması ve her substrat için modelin kinetik ve stokiyometrik parametrelerin ve ihtiyaç duyulması durumunda mikroorganizmaların inhibisyon sabitlerinin tanımlanması gerekmektedir. Modelin orijinal halinde reaktörün işletme sıcaklığı 35 °C' dir. Farklı sıcaklıklarda gerçekçi modelleme yapabilmek için modelde sıcaklık ile değişen parametrelerin; kinetik parametrelerinin, hidroliz sabitlerinin uyarlanması ve modeldeki gaz transfer sabitinin (k_{La}) sıcaklığın fonksiyonunu şeklinde ifade edilmesi gerekmektedir ve uyarlama her bir substrata özel olarak yapılmalıdır. Bu uyarlamanın her bir substrat için ayrı yapılması gerekliliğinin nedeni; farklı organik içeriklere sahip substratların sıcaklık değişimlerinde stokiyometrik ve kinetik özelliklerinin birbirinden farklı değişmesinden kaynaklanmaktadır.

Yukarıda bahsi geçen koşullar altında, yüksek organik içeriğe sahip büyükbaş hayvan gübresi kullanılarak gerçekleştirilen modelleme çalışması sonuçları baz alınarak reaktörün işletme sıcaklığının arttırıldığı zaman biyogaz üretim miktarının ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretim miktarı ve pH düzeyi artmaktadır. Tüm sıcaklık koşulları altında en yüksek biyogaz üretimi OYH' i 2 kg UKM/m³.g olduğu zaman ve 1 gram UKM başına en yüksek metan üretimi miktarının OYH' i 1 kg UKM/m³.g olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Üretilen biyogazın metan içeriğinin sıcaklık ve OYH' nin değişiminde önemli ölçüde değişmediği görülmüştür. Aynı koşullar altında büyükbaş hayvan atığında elde edilen pH düzeyi tavuk gübresine göre daha az olmaktadır. Sıcaklık değişimleri için yapılan

uyarlamanın yüksek organik içeriğe sahip büyükbaş hayvan gübresi için, tavuk gübresine göre daha iyi sonuçlar verdiği düşünülmektedir.

Tavuk atığını substrat olarak yapılan modelleme çalışmaları sonunda tüm OYH' lerde sıcaklık arttığı zaman biyogaz üretimi ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretim miktarı ve pH düzeyi artmaktadır. Sıcaklık düşerken biyogaz üretimi, 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimlerinin düşüş miktarının yüksek organik içerikli büyükbaş hayvan gübresi kullanılarak yapılan modelleme sonuçlarındaki düzeyden daha düşük olmaktadır. Ek olarak OYH' nin arttırıldığı durumda biyogaz miktarında artış, buna karşın 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretim miktarının düştüğü gözlemlenmiştir. Tavuk atığı için en yüksek biyogaz üretimi OYH' i 2 kg UKM/m³ olduğu durumda ve 1 gram UKM başına en yüksek biyogaz ve metan üretimi miktarının OYH' nin 1 kg UKM/m³ olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Tüm işletme koşulları altında tavuk atığından elde edilen biyogaz üretim miktarı ve 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretim miktarı sığır atığından elde edilen değerlere göre yüksek olduğu görülmüştür. Büyükbaş hayvan gübresindeki elde edilen sonuçlara benzer şekilde, biyogazın metan içeriği sıcaklık ve OYH' nin değişiminde önemli ölçüde değişim göstermemiştir. Bu yüzden yüksek organik içerikli substrat seçimi biyogaz santrallerinin verimli olması için çok önemli bir kıstas olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan hassasiyet analizi çalışmasındaki sonuçlar göz önüne alındığında substratın organik içeriğini tanımlayan Xpr, Xch ve Xli parametrelerinin biyogaz üretim miktarı üzerinde çok kuvvetli röle sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Belli parametrelerin (km-pro, km-ac (sırasıyla propiyonat, asetat kullanan mikroorganizmaların maksimum propiyonat, asetat alım hızı), Scat (reaktöre birim zamanda giren sıvı katyon)) biyogaz üretimi üzerindeki etkilerinin çok zayıf olduğu ancak, biyogazın içeriği üzerinde belirleyici rol aldığı sonucuna varılmıştır.

Reaktör işletme sıcaklığının daha düşük seviyelerde tutulması biyogaz ve metan üretim miktarını düşüren bir faktör olduğu halde, özellikle soğuk iklim şartlarına sahip olan yerlerde önemli bir işletme alternatifi olarak önümüze çıkmaktadır. İşletme sıcaklığının mezofilik koşullarda daha düşük seviyelerde tutulması, reaktörü ısıtma için gerekli olan ısı miktarının yüksek sıcaklıkta üretilebilecek ekstra biyogazın kalorifik değerinden fazla olduğu durumda tercih edilebilir bir alternatif olabileceği anlaşılmaktadır. Düşük OYH' lerde 1 gram UKM başına biyogaz ve metan üretimi ve biyogazın metan içeriği daha yüksek olmasına rağmen üretilen biyogaz miktarı ve bertaraf edilen atık miktarı düşük miktarda olmaktadır.

ADM1 modeli deneysel çalışma ile elde uzun surede elde edilebilecek sonuçlar hızlı bir Şekilde elde edilerek zaman ve paradan tasarruf elde edilebilir. Model sayesinde biyogaz santrali için uygun atık seçimi ve/veya atıkların birlikte arıtım oranı seçimi (co-digestion) düşk maliyetle, kolay bir Şekilde belirlenebilir. Ek olarak kurulum aşamasından itibaren santralin hangi çıktılarının santral verimi için daha kritik olduğu belirlenerek hangi çıktıların gözlem altına alınması gerektiğine karar verilebilir. Model sayesinde kurulu bir biyogazın değişik işletme koşullarında nasıl reaksiyon verebileceği tahmin edilebilir ve santral en uygun işletme koşulları belirlenebilir.

Yukarıdaki sonuçlar göz önüne alınarak ADM1 modeli kullanılarak santral projelendirmesi yapılması için substrat karakterizasyonun ve modeldeki kinetik parametrelerin, gerekli olduğu durumda karbon ve azot denge sabitlerinin, inhibisyon katsayılarının substrata göre tanımlanması gerekmektedir. Yukarıda söz edilen uyarlamalarla ADM1, kurulacak bir santralin projelendirilmesinde ve n proje aşamasında sağlıklı bir projeksiyon aracı olabilir. ADM1' in sağladığı sağlıklı model yaklaşımı sayesinde zamandan ve paradan tasarruf edilebilir ve biyogaz santrali kurulum aşasından itibaren santral için dikkat edilmesi gereken hususlar ve santral ıktıları tahmin edilebilir.

7. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRE KATKISI

Mevcut literatürde ADM1 modeli farklı substratlar kullanılarak yapılan biyogaz üretim modellemesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olsa da; ADM1'i aynı anda farklı substratlar üzerinde uygulayıp, model sonuçlarını karşılaştıran sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Bu bağlamda, literatürde bu konuyla ilgili bir boşluk olduğu görülmektedir. Böylece, bu çalışmanın literatürdeki söz konusu boşluğu doldurması bakımından önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bununla birlikte bu çalışmada ADM1 modeli ile farklı reaktör işletme sıcaklık koşullarında gerçekçi bir biyogaz üretim modellemesi yapabilmek için model üzerinde bir dizi değişiklik yapmak gerektiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, farklı reaktör işletme koşullarında modelleme yapabilmek için kullanılan katsayılar temel olarak Bergland vd.'nin (2015) çalışmasından alınmıştır [34]. Bergland vd. çalışmalarında modelin sıcaklık değişimindeki (25, 30, 35 °C) reaksiyonunu tek bir substrat -büyükbaş gübresi- üzerinden ölçmüştür. Bu çalışmada ise ADM1 modeli yine aynı sıcaklık düzeylerinde ancak üç farklı substrat kullanılarak uygulanmıştır. Bu kapsamda, bu çalışmanın Bergland tarafından önerilen katsayıların farklı substratları kullanan biyogaz üretim modellemesinde nasıl çalışacağını gösteren ilk çalışma olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte çalışmanın, farklı sıcaklık düzeylerini ifade etmek için kullanılan katsayıların her bir substrata göre özel olarak belirlenmesi gerektiğini ortaya çıkarması bakımından literatüre anlamlı bir katkı sağladığı düşünülmektedir.

Yukarıdakilere ek olarak, bu çalışmada üç farklı substratın ADM1 modeline göre biyogaz üretim verisi, farklı reaktör işletme sıcaklık düzeylerinde (25, 30, 35°C) ve ayrıca farklı OYH' lerde (1 kg.UKM/m³.g, 1.5 kg.UKM/m³.g, 2 kg.UKM/m³.g) karşılaştırılmıştır. Mevcut literatür incelendiğinde, ADM1 modelinin aynı anda substrat, sıcaklık ve OYH değişimindeki reaksiyonunu inceleyen çalışmaların çok az sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu yönüyle, bu çalışmanın literatürdeki bu boşluğa dikkat çekmesi ve bu alandaki gelecek çalışmalara yol gösterici olması bakımından değerli bir katkı sağladığı belirtilebilir.

8. KAYNAKLAR

- [1] Anonim, “Enerji Atlası,” <http://www.enerjiatlası.com/biyogaz/>, <http://www.enerjiatlası.com/biyogaz/> (Mayıs 2017).
- [2] P. Lusk, “Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook,” *Midwest Res. Inst. U.S. Dep. Energy*, no. September, p. 150, **1998**.
- [3] W. Asvapoositkul, J. Joraden, and S. Wongwises, “Asian Journal on Energy and Environment,” vol. 6, no. 3, pp. 154–164, **2005**.
- [4] N. J. Themelis, “NAWTEC12-2231 Combining Anaerobic Digestion and Waste-To-Energy,” pp. 265–271, **2004**.
- [5] M. and D. C. Davis, *Introduction to Environmental Engineering*. New York: WCB/McGraw-Hill, **1998**.
- [6] T. Conant, A. Karim, and A. Datye, “Coating of steam reforming catalysts in non-porous multi-channeled microreactors,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 4, pp. 882–888, **2008**.
- [7] L. Jiunn-Jyi, L. Yu-You, and T. Noike, “Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion,” *Water Res.*, vol. 31, no. 6, pp. 1518–1524, **1997**.
- [8] R. Y. Morita, “Psychrophilic Bacteria,” vol. 39, no. 2, pp. 144–167, **1975**.
- [9] K. J. Chae, A. Jang, S. K. Yim, and I. S. Kim, “The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure,” *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 1, pp. 1–6, **2008**.
- [10] Y. Miron, G. Zeeman, J. B. Van Lier, and G. Lettinga, “The role of sludge retention time in the hydrolysis and acidification of lipids, carbohydrates and proteins during digestion of primary sludge in CSTR systems,” *Water Res.*, vol. 34, no. 5, pp. 1705–1713, **2000**.
- [11] A. Babae and J. Shayegan, “Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste,” *World Renew. energy Congr.*, pp. 411–417, **2011**.

- [12] M. Henze *et al.*, “Activated Sludge Model No.2d, ASM2d,” *Water Sci. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 165–182, **1999**.
- [13] W. Gujer, M. Henze, T. Mino, and M. Van Loosdrecht, “Activated Sludge Model No. 3,” *Water Sci. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 183–193, **1999**.
- [14] D. J. Batstone *et al.*, “The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).,” *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, **2002**.
- [15] R. L. . Gossett, James M., Belser, “Anaerobic digestion of waste activated sludge,” *J. Environ. Eng. Div.*, no. 108(EE6), pp. 1101–20, **1982**.
- [16] S. G. Pavlostathis and J. M. Gossett, “A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge,” *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 28, no. 10, pp. 1519–1530, **1986**.
- [17] C. Rosen, D. Vrecko, K. V Gernaey, and U. Jeppsson, “Implementing ADM1 for benchmark simulations in Matlab / Simulink,” *Water Sci. Technol.*, vol. 54, no. 4, pp. 11–19, **2006**.
- [18] K. Koch, M. Lübken, T. Gehring, M. Wichern, and H. Horn, “Biogas from grass silage - Measurements and modeling with ADM1,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 21, pp. 8158–8165, **2010**.
- [19] M. Myint, N. Nirmalakhandan, and R. E. Speece, “Anaerobic fermentation of cattle manure: Modeling of hydrolysis and acidogenesis,” *Water Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 323–332, **2007**.
- [20] B. Wett, A. Eladawy, and M. Ogurek, “Description of nitrogen incorporation and release in ADM1,” *IWA Publ.*, vol. 54, no. 4, pp. 67–76, **2006**.
- [21] X. Qu *et al.*, “Anaerobic biodegradation of cellulosic material: Batch experiments and modelling based on isotopic data and focusing on acetoclastic and non-acetoclastic methanogenesis,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 6, pp. 1828–1837, **2009**.
- [22] P. Satpathy, S. Steinigeweg, F. Uhlenthut, and E. Siefert, “Application of Anaerobic Digestion Model 1 (ADM1) for Prediction of Biogas Production,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 12, pp. 86–89, **2013**.
- [23] F. Blumensaat and J. Keller, “Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1),” *Water Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 171–183, **2005**.

- [24] W. Stumm and J. J. Morgan, "Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters," *Aquat. Chem.*, p. 1022, **1996**.
- [25] D. J. Batstone, "High rate anaerobic treatment of complex wastewater," no. Clm, p. 200, **2000**.
- [26] D. J. Costello, *Modelling, Optimisation, and Control of High-rate Anaerobic Reactors*. University of Queensland, **1989**.
- [27] M. Romli, "Modelling and verification of a two-stage high-rate anaerobic wastewater treatment system," University of Queensland, **1993**.
- [28] I. R. Ramsay, *Modelling and Control of High-rate Anaerobic Wastewater Treatment Systems*. University of Queensland, **1997**.
- [29] A. Galí, T. Benabdallah, S. Astals, and J. Mata-Alvarez, "Modified version of ADM1 model for agro-waste application," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 11, pp. 2783–2790, **2009**.
- [30] D. I. Page, K. L. Hickey, R. Narula, A. L. Main, and S. J. Grimberg, "Modeling anaerobic digestion of dairy manure using the IWA Anaerobic Digestion Model no. 1 (ADM1)," *Water Sci. Technol.*, vol. 58, no. 3, pp. 689–695, **2008**.
- [31] C. Rosen and U. Jeppsson, "Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework," *Tech. Rep.*, pp. 1–37, **2006**.
- [32] A. Normak, J. Suurpere, K. Orupõld, E. Jõgi, and E. Kokin, "Simulation of anaerobic digestion of cattle manure," *Agron. Res.*, vol. 10, no. SPEC. ISS. 1, pp. 167–174, **2012**.
- [33] D. Der Naturwissenschaften and H. P. Biernacki, "Model based sustainable production of biomethane," **2014**.
- [34] W. H. Bergland, C. Dinamarca, and R. Bakke, "Temperature Effects in Anaerobic Digestion Modeling," *Proc. 56th SIMS*, no. 1, pp. 261–269, **2015**.
- [35] Arikan, O. A., Mulbry, W., & Lansing, S., Effect of temperature on methane production from field-scale anaerobic digesters treating dairy manure. *Waste Management*, 43, 108-113, **2015**.
- [36] Babae, Azadeh, and Jalal Shayegan. "Effect of organic loading rates (OLR) on

production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste." *World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden*. No. 57. Linköping University Electronic Press, **2011**.

- [37] Kestutis, N., Kestutis, V., Arnas, P. and Vidmantas, Z., INFLUENCE OF TEMPERATURE VARIATION ON BIOGAS YIELD FROM INDUSTRIAL WASTES AND ENERGY PLANTS. In: *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*, **2013**.

- [38] Dalkılıç, K., & Ugurlu, A., Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic-thermophilic two stage anaerobic system. *Journal of bioscience and bioengineering*, 120(3), 315-322, **2015**.

- [39] Wang, F., Zhang, C., & Huo, S., Influence of fluid dynamics on anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Environmental technology*, 38(9), 1160-1168, **2017**.

9. EKLER

EK-1

Tablo 37. Sıvı haldeki İnhibitörler için biyokimyasal hız katsayıları ve kinetik hız denklemleri (i=1-12, j=1-19)

Bileşen →	i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Hzr (p, kg KOl/m ³ gün)
j	Proses ↓	Ssu	Saa	Sfa	Sva	Ssu	Spro	Sac	Sh2	Scld	Sco2	SN	SI	
1	Disintegrasyon										n	m	f _{si,xc}	kdis·Xc
2	Karbonhidrat	1												khyd·ch·Xch
3	Protein		1											khydr·Xor
4	Lipid	1-fa,li		fa,li										klydli·Xli
5	Şekerletri giderimi	-1				(1-Y _{su})·fhu,su	(1-Y _{su})·fpro,su	(1-Y _{su})·fac,su	(1-Y _{su})·fh2,su					Ssu km _{su} ·-----·Xsu·I1 Ks + S
6	Aminoasit giderimi		-1		(1-Y _{aa})·fva,aa	(1-Y _{aa})·fhu,aa	(1-Y _{aa})·fpro,aa	(1-Y _{aa})·fac,aa	(1-Y _{aa})·fh2,aa					Saa km _{aa} ·-----·Xaa·I1 Ks + Saa
7	LCFA Giderimi,			-1				(1-Y _{fa})·0,7	(1-Y _{fa})·0,3					Sfa km _{fa} ·-----·Xfa·I2 Ks + Sfa
8	Valerat kullannu				-1		(1-Y _{cd})·0,54	(1-Y _{cd})·0,31	(1-Y _{cd})·0,15					Sva km _{cd} ·-----·Xcd·-----·I2 Ks + Sva 1+Svu/Sva
9	Bütirat giderimi					-1		(1-Y _{cd})·0,8	(1-Y _{cd})·0,2					Sbu km _{cd} ·-----·Xcd·-----·I2 Ks + Sbu 1+Sva/Sbu
10	Propiyonat giderimi						-1	(1-Y _{pro})·0,57	(1-Y _{pro})·0,43					Spro km _{pro} ·-----·Xpro·I2 Ks + Spro
11	Asetat giderimi							-1	(1-Y _{ac})					Sac km _{ac} ·-----·Xac·I3 Ks + Sac
12	Hidrojen giderimi								-1	(1-Y _{H2})				km _{H2} ·-----·Xh2·I1 Sh2 Ks + Sh2
13	Xsu inhibisyonu													kdecxsa·Xsa
14	Xaa inhibisyonu													kdecxaa·Xaa
15	Xfa inhibisyonu													kdecxfa·Xfa
16	Xcd inhibisyonu													kdecxcd·Xcd
17	Xpro inhibisyonu													kdecxpro·Xpro
18	Xac inhibisyonu													kdecxac·Xac
19	Xh2 inhibisyonu													kdecxh2·Xh2

Inhibisyon Parametreleri:
I1=f_{gH}·I_N·I_{im}
I2=f_{gH}·I_N·I_{im}·I_{h2}
I3=f_{gH}·I_N·I_{im}·I_{NH3}
·Xac

EK-2

Tablo 38. Partikül haldeki inhibitörler için biyokimyasal hız katsayıları ve kinetik hız denklemleri (i=13-24, j=1-19)

Bileşen →	i	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Hız (ρ, kg KOI/m ³ gün)
Proses ↓	X_c	X_{ch}	X_{pr}	X_{li}	X_{su}	X_{aa}	X_A	X_{d4}	X_{pro}	X_{ac}	X_{H2}	X_i	$F_{i,xyz}$	$K_{dir} \cdot X_c$
Disintegrasyon	-1	$F_{i,xyz}$	$F_{i,xyz}$	$F_{i,xyz}$										$K_{dir,d4} \cdot X_{ch}$
Karbonhidrat		-1												$K_{dir,pr} \cdot X_{pr}$
Protein			-1											$K_{dir,li} \cdot X_{li}$
Lipid				-1										$K_{dir,su} \cdot X_{su}$
Şekerlerin giderimi					Y_{su}									$S_{su} \cdot \frac{K_{su,S}}{K_S + S} \cdot X_{su} \cdot I_1$
Aminoasit giderimi						Y_{aa}								$S_{aa} \cdot \frac{K_{aa,S}}{K_S + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_1$
LCFA giderimi							Y_A							$K_{m,aa} \cdot \frac{K_s + S_{aa}}{S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_2$
Valerat giderimi								Y_{d4}	Y_{d4}					$S_{va} \cdot \frac{K_{m,d4}}{K_S + S_{va}} \cdot X_{d4} \cdot \frac{1 + S_{su}/S_{va}}{1 + S_{su}/S_{va}} \cdot I_2$
Bütirat giderimi									Y_{d4}					$K_{m,d4} \cdot \frac{S_{su}}{K_S + S_{su}} \cdot X_{d4} \cdot \frac{1 + S_{su}/S_{va}}{1 + S_{su}/S_{va}} \cdot I_2$
Propiyonat giderimi										Y_{pro}				$K_{m,pro} \cdot \frac{S_{pro}}{K_S + S_{su}} \cdot X_{pro} \cdot I_2$
Asetat giderimi											Y_{ac}			$K_{m,ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_S + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_3$
Hidrojen giderimi												Y_{H2}		$K_{m,H2} \cdot \frac{S_{H2}}{K_S + S_{H2}} \cdot X_{H2} \cdot I_1$
X_{su} inhibisyonu	1					-1								$K_{dec,su} \cdot X_{su}$
X_{aa} inhibisyonu	1						-1							$K_{dec,aa} \cdot X_{aa}$
X_A inhibisyonu	1							-1						$K_{dec,A} \cdot X_A$
X_{d4} inhibisyonu	1								-1					$K_{dec,d4} \cdot X_{d4}$
X_{pro} inhibisyonu	1									-1				$K_{dec,pro} \cdot X_{pro}$
X_{ac} inhibisyonu	1										-1			$K_{dec,ac} \cdot X_{ac}$
X_{H2} inhibisyonu	1											-1		$K_{dec,H2} \cdot X_{H2}$
														Inhibisyon Faktörleri:
Kompozit, kg KOI/m ³														$I_1 = I_{d4} \cdot I_{pr} \cdot I_{li} \cdot I_{su}$
Karbon hidrat, kg KOI/m ³														$I_2 = I_{d4} \cdot I_{pr} \cdot I_{li} \cdot I_{su} \cdot I_{aa}$
Proteinler, kg KOI/m ³														$I_3 = I_{d4} \cdot I_{pr} \cdot I_{li} \cdot I_{su} \cdot I_{aa} \cdot I_{H2}$
Lipidler, kg KOI/m ³														$I_4 = I_{d4} \cdot I_{pr} \cdot I_{li} \cdot I_{su} \cdot I_{aa} \cdot I_{H2} \cdot I_{ac}$
Şeker parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Aminoasit parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
LCFA parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Valrerat-bütirat parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Propiyonatparçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Asetat parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Hidrojen parçalayan mikroorg., kg KOI/m ³														
Partiküler inert, kg KOI/m ³														

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Süleyman Tunçel

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Bekâr

E-posta: suleymansistem@gmail.com

Telefon: 0506 245 08 02

Adresi: Çukurambar mah., Budapeşte Cad., 24/17, Çankaya, Ankara

Eğitim:

Lisans: T.O.B.B. Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Temiz Tükenmez Enerjiler Bölümü

Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce, İleri

İş Deneyimi

İskenderun Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi, (2017-)

Deneyim Alanları: Matlab Uygulamaları, Java ile programlama, Güneş Santrallerinin Modellenmesi

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi: -

Tezden Üretilmiş Yayınlar: -

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar: -



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

Temiz Tokermez Enerjiler ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

Tarih: 14/07/2017

Tez Başlığı / Konusu: Bıyıkbaş Hayvan Gıbesi ve Tavuk Gıbesinden Biyogaz Üretiminin ADM1 Kullanılarak Modellenmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 77 sayfalık kısmına ilişkin 21/06/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Enstitü adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dâhil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Süleyman TUNÇEL

14.07.2017

Öğrenci No: N14222034

Anabilim Dalı: Temiz Tokermez Enerjiler

Programı: Yüksek Lisans

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Ayşenur UĞURLU
(Unvan, Ad Soyad, İmza)