T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAYVANSAL VE BİTKİSEL ATIKLARDAN BİYOGAZ ÜRETİM PROSESİNİN SİMİLASYON VE OPTİMİZASYONU

VOLKAN ÇOBAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAYVANSAL VE BİTKİSEL ATIKLARDAN BİYOGAZ ÜRETİM PROSESİNİN SİMÜLASYON VE OPTİMİZASYONU

VOLKAN ÇOBAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. MAHMUT BAYRAMOĞLU

2. DANIŞMAN
DOÇ. DR. DURMUŞ KAYA

GEBZE
2009

YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05.10.2009 tarih ve 2009/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 23.10.2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Volkan ÇOBAN 'nın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE : Doç. Dr. Hasan SADIKOĞLU

ÜYE : Doç. Dr. Mehmet KOBYA

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: HAYVANSAL VE BİTKİSEL ATIKLARDAN BİYOGAZ ÜRETİM PROSESİNİN SİMÜLASYON VE OPTİMİZASYONU

YAZAR ADI: VOLKAN ÇOBAN

Biyogaz, biyokütlenin havasız ortamda çeşitli bakteri gruplarının ortak faaliyetleri sonucunda çürütülmesi esnasında ortaya çıkan ve ağırlıklı olarak metan ve karbondioksit içeren bir gazdır. Biyogaz ile organik atıkların bertarafı sağlanırken beraberinde enerji de üretilebilmektedir. Son yıllarda gerek çevresel koruyucu kriterlerin gerekse yenilenebilir enerjiye olan ilginin artmasıyla birlikte biyogaz ve biyogaz teknolojisi giderek yaygınlaşmaktadır.

Bu tez, KOCAELİ ilinde TÜRKİYE'nin ticari boyutta ilk biyogaz tesisi olarak kurulması planlanan ve TUBİTAK'ın TARAL projeleri kapsamında "Bitkisel ve Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi ve Entegre Enerji Sistemlerinde Kullanımı (BİYOGAZ)" adlı projenin iş paketleri ile birlikte Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan ortak çalışmalar sonucunda oluşmuştur. Tezin amacı; hayvansal ve bitkisel atıklardan biyogaz üretim prosesinin ADM1 ve ASPEN HYSYS modellemesi kullanılarak simülasyonlarının oluşturulması ve bu simülasyonlarda elde edilen sonuçlar kullanılarak optimum işletme koşullarının belirlenmesidir. Tez çalışmasında, besleme debisi ve hammaddelerin kuru madde oranı gibi önemli proses değişkenleri kullanılarak biyogaz miktarı, biyogaz içeriği, bekletme süresi gibi işletme parametrelerinin optimum değerleri tespit edilmiştir. Yapılan simülasyon ve optimizasyon çalışmaları sonucunda 1:1 oranında bitkisel ve hayvansal atık içeren bir hammadde kompozisyonu için fermantör içi optimum hammadde kuru madde oranının % 12.4 ve bekletme süresinin 20 gün olduğu sonucuna varılmıştır. Bu şartlarda proses işletildiğinde günlük % 70 metan içerikli 1080 m3 biyogaz elde edilebileceği tespit edilmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE: SIMULATION AND OPTIMIZATION OF BIOGAS PRODUCTION PROCESS FROM AGRICULTURAL AND ANIMAL WASTES

AUTHOR'S NAME: VOLKAN ÇOBAN

Biogas, which contains mainly methane and carbon dioxide gases, is produced during fermentation process of biomass under the anaerobic condition as a result of various bacterial groups' activities. While organic wastes are treated energy can also be produced via biogas production. In recent years, biogas and biogas technology has become widespread in parallel with the increased interest of renewable energy and environmental protection criteria.

This thesis has been done as a result of collaborative studies with Gebze Institute of Technology and work packages of the "The Production of Biogas from Agricultural and Animal Wastes and Utilization of Obtained Gases in Integrated Energy Conversion Technologies (BIOGAS)" Project which is supported by TUBITAK's TARAL Projects. The aim of the thesis is to create simulations of the biogas production process from agricultural and animal wastes by using ADM1 and ASPEN HYSYS models and determining the optimum operating conditions by using results obtained in these simulations. In this thesis, the optimum values of operating parameters such as the amount of biogas, biogas content and hydraulic retention time have been identified with usage of important process variables like the flow rate and dry matter content of raw materials. According to completed simulations and optimizations, optimum dry matter content in the fermenter was %12.4 and hydraulic retention time was 20 days have been concluded for a raw material composition containing 1:1 ratio of animal and agricultural wastes. When the process had been operated under these conditions, 1080 m^3 biogas, including 70% methane content, could be produced.

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalar süresince engin bilgi birikimini benden esirgemeyen, teorik, pratik ve akademik tecrübesiyle bana daima yol gösteren değerli hocam sayın Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU'na,

Yüksek lisans eğitimine başlama noktasında beni cesaretlendiren, çalışmaların süresince yardımlarını ve güler yüzünü eksik etmeyen ve daima pozitif yaklaşarak bana sürekli moral aşılayan değerli hocam sayın Doç. Dr. Durmuş KAYA'ya,

Tez çalışmaları süresince desteğini eksik etmeyen değerli hocam sayın Doç. Dr. Kamil EKİNCİ'ye,

Çalışma hayatı ile sürdürdüğüm bu çalışma süresince tüm gerekli izinleri sağlayan ve bana daima destek olan başta Doç. Dr. Mustafa TIRIS olmak üzere TÜBİTAK-MAM'daki tüm amirlerime,

Çalışma ortamını birlikte paylaştığımız çalışma arkadaşlarım Selman ÇAĞMAN, Alptekin YAĞMUR, Bilgin SARAÇ ve Muharrem EYİDOĞAN'a

Moral ve motivasyonumun sürekli yüksek olmasını sağlayan ve manevi desteklerini daima üzerimde tutan başta eşim olmak üzere anne, baba ve kardeşime,

TEŞEKKÜRÜ bir borç bilirim.

Volkan Çoban

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	İİİ
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	Vİ
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	Vİİ
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	İX
ŞEKİLLER DİZİNİ	Xİİ
TABLOLAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ	1
2. BİYOGAZ	6
2.1. Biyogaz Kullanımının Üstünlükleri;	7
2.2. Biyogaz İçeriği	9
2.3. Biyogaz Üretimi İçin Kullanılabilecek Hammaddeler	10
2.4. Biyogaz Üretim Aşamaları	15
2.4.1. Hidroliz Aşaması	15
2.4.2. Asit Oluşum Aşaması	16
2.4.3. Asetik Asit Oluşum Aşaması	16
2.4.4. Metan Oluşum Aşaması	17
2.4.5. Biyogaz Üretimini Etkileyen Parametreler	17
3. BİYOGAZ SİSTEMİ MODEL BÜYÜKLÜKLERİ	19
3.1. Biyogaz Sistemi Tasarım Büyüklükleri	20
3.2. Kocaeli İline Ait İklim ve Yer Bilgileri	22
3.3. Tesiste Kullanılacak Hammadde Bilgileri	22
3.4. Model ve Tesis İşletim Bilgileri	24
3.4.1. Modellere Ait Bilgiler	24
3.4.2. Tesis İşletim Bilgileri	25
3.4.3. Biyogaz Fermantörünün Geometrisi	26
4. BİYOGAZ SİSTEMİ ADM-1 MODELLEMESİ	29
4.1. Modelde Kullanılan Dönüşüm Prosesleri	30
4.2. Model Parametreleri ve Model Değişkenleri	31

4.2.1. Dinamik Durum Değişkenleri 33
4.2.2. Oran Denklem Matrisi 33
4.3. CSTR Modellemesi 36
4.3.1. Genel Sıvı Faz Denklikleri 36
4.3.2. Genel Gaz Fazı Denklikleri 37
4.4. Model Eşitlikleri 38
4.4.1. Proses Oran Denklemleri 38
4.4.2. Prosesin Engellenmesi 40
4.4.3. Sıvı Fazı Eşitlikleri 41
4.4.4. Gaz Fazı Eşitlikleri 45
4.4.5. Cebirsel Eşitlikler 45
4.5. ADM1 Modeli Parametre Değerleri 46
4.6. ADM1 Modelinin Biyogaz Tesisine Adaptasyonu 49
4.6.1. Uyarlanmış ADM1 Modeli 50
5. BİYOGAZ SİSTEMİ ENTEGRE ENERJİ SİSTEMİ MODELLEMESİ 53
5.1. Model Denklikleri 53
5.2. Model İşletim Bilgileri 56
6. BİYOGAZ SİSTEMİ OPTİMİZASYONU 58
6.1. Biyogaz Sisteminin WEST Simülatörüne Uyarlanması 58
6.2. Biyogaz Üretim Optimizasyonunun Yapılandırılması 59
6.3. Enerji Üretim Sistemi Optimizasyonunun Yapılandırılması 60
7. SİMİLASYON VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI 62
7.1. ADM-1 Modellemesi Sonuçları 62
7.2. Biyogaz Sistemi Entegre Enerji Sistemi Modellemesi Sonuçları 65
7.3. Biyogaz Sistemi Optimizasyon Sonuçları 68
7.3.1. % 9 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar 68
7.3.2. % 10.1 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar 72
7.3.3. % 11.2 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar 75
7.3.4. % 12.4 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar 78
7.3.5. % 13.6 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar 80
8. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ 83
KAYNAKLAR 85
ÖZGEÇMİŞ 88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

TKM	: Toplam Kuru Madde
UM	: Uçucu Organik Maddeler
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
KOİ/ COD	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
NH4-N	: Amonyum Azotu
H_{gas}	: Gaz sabiti
$K_{a,asit}$	: Asit baz denge katsayısı
K_H	: Henry katsayısı
R	: Gaz sabiti ($8.314x10^{-2}$)
ΔG	: Serbest enerji
C_i	: Bileşen (component), i, nin karbon içeriği
N_i	: Bileşen, i, nin azot içeriği
$\nu_{i,j}$	: j prosesinde bileşen i nin oran katsayısı
$f_{ürün,\ substrat}$	: Substrat üzerinde ürün verimi (sadece katabolizm)
$K_{A/Bi}$	: Asit baz kinetik parametresi
k_{dec}	: Birinci derecenden azalma (decay) oranı
$I_{engelleyici,\ proses}$	: Engelleme fonksiyonu
K_{proses}	:Birinci derecenden parametre (hidroliz için)
k_{La}	:Gaz-sıvı transfer katsayısı
$K_{I,\ engelleyici,\ substrat}$	: % 50 engelleyici konsantrasyon
$k_{m,proses}$	:Monod maksimum spesifik alım oranı
$K_{s,proses}$	:Yarılama değeri
ρ_j	:Proses j nin kinetik oranı
$Y_{substrat}$	:Substrat üzerinde biyokütlenin verimi
μ_{max}	:Monod maksimum spesifik büyüme oranı
$p_{gas,i}$	:Gaz i nin basıncı
P_{gas}	:Toplam gaz basıncı
S_i	:Çözünebilen bileşen i
$T_{res,x}$	:Katıların uzatılmış (extended) kalma süresi
T	:Sıcaklık

V	:Hacim
X_i	:Partikül bileşen i
ADM 1	: Anaerobic Digestion Model 1
V_gas	:Fermentör gaz depolama hacmi
P_CH4	:Metanın kısmi basıncı
P_CO2	:Karbondioksitin kısmi basıncı
P_h2	:Hidrojenin kısmi basıncı
Q_out	:Çıkış akışı
Q_Out_gas	:Biyogaz akışı
M_{biogaz}	: Motora giren biogaz toplam kütlesi (kg/s)
M_{hava}	: Motora giren hava toplam kütlesi (kg/s)
$M_{eksozgazı}$	: Motor çıkışı eksoz gazının toplam kütlesi (kg/s)
m_{CH_4}	: Metanın kütlesel debisi (kg/s)
m_{CO_2}	: Karbondioksitin kütlesel debisi (kg/s)
m_{H_2O}	: Suyun kütlesel debisi (kg/s)
m_{O_2}	: Oksijenin kütlesel debisi (kg/s)
m_{H_2}	: Hidrojenin kütlesel debisi (kg/s)
m_{NH_3}	: Amonyak'ın kütlesel debisi (kg/s)
m_{H_2S}	: Hidrojen Sülfürün kütlesel debisi (kg/s)
m_{Ar}	: Argonun kütlesel debisi (kg/s)
x_{CH_4}	: Metanın mol fraksiyonu
x_{CO_2}	: Karbondioksitin mol fraksiyonu
x_{H_2O}	: Suyun mol fraksiyonu
x_{O_2}	: Oksijenin mol fraksiyonu
x_{H_2}	: Hidrojenin mol fraksiyonu
x_{NH_3}	: Amonyağın mol fraksiyonu
x_{H_2S}	: Hidrojen Sülfürün mol fraksiyonu
x_{Ar}	: Argonun mol fraksiyonu

ΔE	: İç enerji değişimi (kW)
$E_{eksozgazı}$	: Ekzosgazının toplam iç enerjileri (kW)
E_{biogaz}	: Biogazın toplam iç enerjisi (kW)
E_{hava}	: Havanın toplam iç enerjisi (kW)
$P.E_{eksozgazı}$	: Eksozgazının toplam iç potansiyel enerjisi (kW)
$P.E_{biogaz}$	: Biogazın toplam iç potansiyel enerjisi (kW)
$P.E_{hava}$	: Havanın toplam iç potansiyel enerjisi (kW)
$K.E_{eksozgazı}$	: Eksozgazının toplam iç kinetik enerjisi (kW)
$K.E_{biogaz}$	: Biogazın toplam iç kinetik enerjisi (kW)
$K.E_{hava}$	: Havanın toplam iç kinetik enerjisi (kW)
$h^0_{eksozgazı}$	: Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) eksozgazının oluşum entalpisi (kj/kg)
h^0_{biogaz}	: Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) biogazlarının oluşum entalpisi (kj/kg)
h^0_{hava}	: Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) beslenen havanın oluşum entalpisi (kj/kg)
$h_{eksozgazı}$	: Eksozgazı akışının entalpisi (kj/kg)
h_{biogaz}	: Biogaz akışının entalpisi (kj/kg)
h_{hava}	: Beslenen hava akışının entalpisi (kj/kg)
S_ac	: Asetat
S_bu	: Bütirat
S_va	: Valerat
S_pro	: Propiyonat
X_ac	: Acetotrophic Metanogenler
X_H2	: Hyrogenotrophic Metanogenler
λ	: Yakıt hava oranı
$C_{feed,O2}$	: Taze havanın oksijen içeriği (kg/kg)
$C_{drain,O2}$	: Egzoz havasının oksijen içeriği (kg/kg)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
1.1 Biyokütle kaynakları	4
1.2 Türkiye'deki hayvansal kaynaklı kullanılabilir atıkların illere göre dağılımı	5
2.1 Biyogaz tesisi örnek akış şeması	7
2.2 Organik maddeden biyogaz üretim akışı	10
2.3 Madde bazında biyogaz üretim miktarları	11
2.4 Anaerobik bakteri grupları	15
3.1 Biyogaz üretim proses şeması	19
3.2 Modellemede kullanılan biyogaz akış şeması	25
3.3 Fermantör içi görünümü	27
3.4 Karıştırıcıların fermantör içerisindeki yerleşimleri	27
3.5 Karıştırıcıların detay çizimleri	28
4.1 %10 İnertler, %30 Karbonhidrat, %30 Protein ve %30 Lipit içeren komposit partikül materyal için kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) akım şeması	31
4.2 CSTR model gösterimi	36
5.1 Ko-jeneratör grubu proses simülasyonu (ASPEN HYSYS 2006)	57
6.1 Biyogaz sisteminin WEST simülatöründeki akış diyagramı	59
6.2 Güç üretimin metan miktarı ile değişimi grafiği	60
7.1 Günlük elde edilen biyogazın zamanla değişimi	62
7.2 Gaz depolama alanında gazların kısmi basınçlarının zamanla değişimi	63
7.3 pH'ın zamanla değişimi	63
7.4 Biyokütle konsantrasyonunun zamanla değişimi	64
7.5 Uçucu yağ asitlerinin zamanla değişimi	64
7.6 Biyogaz metan oranı değişimi ile ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve kayıpların değişimi	66

7.7 Biyogaz debisi değişimi ile ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve kayıpların değişimi 66

7.8 Yakıt/Hava oranının fonksiyonu olarak ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve enerji kayıplarının değişimi 67

7.9 Yanma oranın ko-jeneratörden çıkan enerjiye ve kayıplara değişimi 68

7.10 %9 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 69

7.11 %9 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 69

7.12 %9 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 70

7.13 %9 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 70

7.14 %9 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 71

7.15 %9 KM ve 30 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 71

7.16 %10.1 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 72

7.17 %10.1 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 73

7.18 %10.1 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 73

7.19 %10.1 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 74

7.20 %10.1 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 74

7.21 %11.2 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 75

7.22 %11.2 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 76

7.23 %11.2 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 76

7.24 %11.2 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 77

7.25 %11.2 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 77

7.26 %12.4 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 78

7.27 %12.4 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 79

7.28 %12.4 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 79

7.29 %12.4 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 80

7.30 %13.6 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 81

7.31 %13.6 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 81

7.32 %13.6 KM ve 12.5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 82

7.33 %13.6 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi 82

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
1.1. Ülkemizin beklenen elektriksel enerji talebi	2
1.2. Türkiye enerji üretim verileri	3
1.3. Ülkemizin fosil enerji kaynakları	3
2.1. Tavuk gübresi ve fermante çamuru denemesi sonuçları	12
2.2. Çeşitli zirai ürünlerin biyogaz potansiyeli	14
3.1. Biyogaz tesis büyüklükleri	21
3.2. İklim verileri.	22
3.3. Modelleme çalışmalarında kullanılacak olan hayvansal atıkların kimyasal ve fiziksel özellikleri	23
3.4. Modelleme çalışmalarında kullanılacak olan bitkisel atıkların kimyasal özellikleri	24
4.1. Denge Katsayı ve Sabitleri	31
4.2. Stokiyometrik Katsayılar	32
4.3. Kinetik parametreler ve oranlar	32
4.4. Dinamik ve cebirsel değişkenler	32
4.5. Dinamik durum değişkenlerinin karakteristikleri	33
4.6. Çözünebilen bileşenler (i=1-12; j=1-19) biyokimyasal oran katsayıları (vi,j) ve kinetik oran eşitlikleri (ρj)	34
4.7. Partikül bileşenler (i=13-24; j=1-19) biyokimyasal oran katsayıları (vi,j) ve kinetik oran eşitlikleri (ρj)	35
4.8. Stokiyometrik parametre değerleri	46
4.9. Biyokimyasal parametre değerleri	47
4.10. Fiziko-kimyasal parametre değerleri	48
4.11. Fiziksel parametre değerleri	49
4.12. ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan parametreler.	50
4.13. ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan durum değişkenleri	51
4.14. ADM1 modeline girilen parametre ve değişkenler.	52

1. GİRİŞ

Tüm dünyada, son yıllarda sanayi ve tarımsal üretimin artışı ve tüketime dayalı bir toplumsal yapının şekillenmesiyle orantılı olarak atık miktarları da önemli seviyelerde artış göstermiştir. Sanayi ve tarımsal üretimin oluşturduğu atıklar çevresel açıdan git gide büyük problemler oluşturur hale gelmiştir. Bu durum gerek üreticiler gerekse doğayla sürekli iç içe olan kullanıcılar açısından önem arz etmektedir. Bu çerçevede tüm toplumların sorunu haline gelen çevre boyutu için bakış açısı topluca hareket etme ve önlemler alma yönündedir.

Bunlara paralel olarak, Birleşmiş Milletlerin 1992 yılında düzenlediği Rio toplantısında açıklanan deklarasyonunda; " Tüm ülkeler 2000 yılına kadar atık arıtımı ve bertarafı için kalite kriterlerini, hedef ve standartlarını belirleyecek; sanayileşmiş ülkeler 1995 yılı itibariyle, gelişmekte olan ülkeler ise 2005 yılı itibariyle tüm atık su ve katı atıklarının en az %50' sini arıtacaklardır ve 2025 yılı itibariyle tüm ülkeler kanalizasyon, atıksu ve katı atıklarını ulusal ya da uluslar arası kalite kriterleri ile uyumlu bir şekilde bertaraf edeceklerdir." ifadeleri yer almıştır.

Avrupa Birliği ise 26 Nisan 1999 yılında yürürlüğe koyduğu direktifinde; "Üyelik yükümlülükleri içerisine giren ülkeler en az 5 yıl içerisinde deponi alanlarında biriktirilen biyolojik olarak arıtılabilir atıklarını, 1995 yılındaki toplam seviyesinin %25 altına indireceklerdir" ifadesiyle üye ülkelerin atık bertarafındaki hedeflerini belirlemiştir.

Oluşan atıkların bertarafı arzına paralel olarak bilim adamları atıkların çevreye olan olumsuz etkisini önlemek amacıyla çeşitli bertaraf yöntemleri geliştirmektedir.

Tüm çevresel etkilere ek olarak, sanayinin büyümesi ve hızlı kalkınmanın ana ihtiyaç unsurlarından biri olan enerji talebindeki artış da bu büyüme hızına doğru orantılı olarak artmıştır. Ülkemiz açısından özellikle 1990'lı yıllarda ivme kazanan sanayileşme ve bunun beraberinde gelen kentleşme ülkemizi bir enerji darboğazına doğru sürüklemiştir. Bunun

göstergesi olarak ülkemizin elektriksel enerji tüketimi 1961'lı yıllı içerisinde 3 milyar kWh iken 2001 yılında 126 milyar kWh, 2005 yılında ise 160.3 kWh olmuştur. Son 46 yılın ortalama elektriksel enerji talebi artışı incelendiğinde bu rakamın yıllık % 9.3 olduğu görülmektedir. 2005 yılının kasım ayında Genel Enerji Özel İhtisas Komisyonu'nun yayınladığı 9. Kalkınma Planı Taslak Raporu'na göre iyimser ve kötümser yaklaşımlar ele alınarak ülkemizin enerji talebi beklentileri Tablo 1.1.'deki gibidir [Ültanır, 2006].

Tablo 1.1Ülkemizin beklenen elektriksel enerji talebi

Açıklama	**2007**	**2010**	**2013**
Yüksek senaryo enerji talebi (milyar kWh)	190.7	242.0	306.1
Düşük senaryo enerji talebi (milyar kWh)	180.3	216.8	260.4

Gerçekleşen ve beklenen bu büyük enerji talebi artışına karşın ülkemizin öz kaynaklardan enerji üretimi aynı büyüklükte artamamıştır. Ülkemizin enerji kaynakları incelendiğinde enerji talebinin büyük bir kısmının yurtdışından alınan doğalgazdan ve ülkemizdeki fosil kaynaklardan sağlandığı görülmektedir. Tablo 1.2.'deki enerji üretim verileri incelendiğinde 2007 yılı için dışarıdan temin edilen doğalgazın üretim içerisindeki payının yaklaşık %50'lerde olduğu görülmektedir. Ayrıca yine büyük bir kısmı yurtdışı kaynaklı fuel oilden üretilen elektriğin üretim içindeki payı %20'lerde olup sadece doğalgaz ve fuel oilden kaynaklı dışa bağımlılık üretim açısından %70 değerlerindedir. Bu % 70'lik üretim için kullanılan hammaddelerin ülkemizde bulunabilirlikleri fosil enerji kaynakları olarak Tablo 1.3' te verilmiştir [Kaya, 2006]. Tablodaki veriler incelendiğinde Türkiye'nin ana enerji üretim kaynakları için hemen hemen yok denebilecek üretkenliğe sahip olduğu sonucuna varabiliriz.

Bunlara ek olarak ülkemizde linyit, taş kömürü, hidrolik gibi kaynaklardan da enerji üretilmektedir. Ancak 2007 yılı için tüm elektrik üretiminin sadece %30'unu karşılayabilen öz kaynakların arttırılabilirliği çok sınırlı olduğu göze alındığında enerjideki dışa bağımlılığı azatlamak için yeni enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmaz gözükmektedir.

Tablo 1.2 Türkiye enerji üretim verileri [TÜİK,2008]

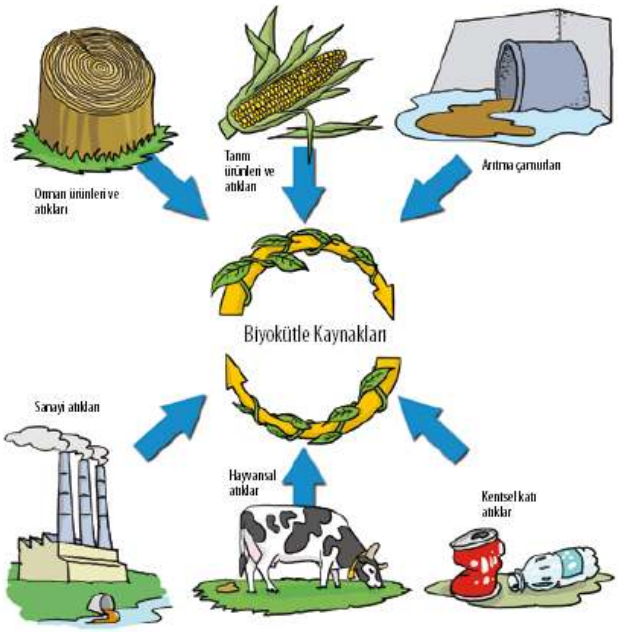
	2003	2004	2005	2006	2007
Kurulu güç - Installed capacity (MW)	35 587.0	36 824.0	38 843.5	40 564.8	40 835.7
Brüt üretim - Gross production (GWh)	140 580.5	150 698.3	161 956.2	176 299.8	191 558.1
Taşkömürü - Coal	8 663.0	11 998.1	13 246.2	14 216.6	15 136.2
Linyit - Lignite	23 589.9	22 449.5	29 946.3	32 432.9	38 294.7
Fuel oil - Fuel oil	8 152.7	6 689.9	5 120.7	4 232.4	6 469.6
Motorin - Diesel oil	4.4	7.3	2.5	57.7	13.3
Doğal gaz - Natural gas	63 536.0	62 241.8	73 444.9	80 691.2	95 024.8
Hidrolik (su) - Hydraulic	35 329.5	46 083.7	39 560.5	44 244.2	35 850.8
Diğer - Other (1)	1 305.0	1 228.0	635.1	424.8	768.7

Tablo 1.3 Ülkemizin fosil enerji kaynakları

Kaynaklar	**Görünüşteki**	**Muhtemel**	**Mümkün**	**Toplam**
Taş kömürü (milyon ton)	428	449	249	1126
Linyit (milyon ton)	7339	626	110	8075
Asfaltit (milyon ton)	45	29	8	82
Bitumunous!!! (milyon ton)	555	1086	269	1641
Yağ (milyon ton)	36	-	-	36
Doğal Gaz (milyar m^3)	8.8	-	-	8

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle dünya üzerinde en yaygın olarak kullanılanlardandır. Biyokütle temeli canlılara dayanan ve belli bir enerji potansiyeli bulanan maddelere verilen genel bir addır. Hayvansal ve bitkisel atıklar, organik endüstriyel atıklar, orman ve ağaç atıkları, tarım atıkları, su yosunları ile soya fasülyesi, mısır, ayçiçeği gibi çeşitli enerji bitkileri biyokütle kaynağı olarak kullanılabilmektedir.

Çeşitli yöntemlerle biyokütle kaynaklarından enerji elde edilebilmektedir. Bunlar, biyokütle ısı dönüşüm teknolojileri, biyoetanol, biyometanol, biyodizel, biyogaz, Fischer-Tropsch sentezi yakıtları ve dimetil eter gibi sıvı yakıtlardır. Isı dönüşüm teknolojilerinin en kolayı doğrudan yakmadır. Doğrudan yakma çoğu köylerimizde uzun zamanlardan buyana uygulanan bir yöntemdir. Diğer ısı dönüşüm teknolojisi ise gazlaştırmadır. Gazlaştırma da biyokütle gazlaştırıcı denilen reaktörlerde yüksek sıcaklıklarda enerji taşıyıcı gazlara çevrilmektedir. Daha sonra bu gaz yakılarak enerji eldesi sağlanmaktadır.



Şekil 1.1 Biyokütle kaynakları [ÇAĞLAYAN ve ark., 2009]

Yapısında şeker ihtiva eden her türlü biyokütle kaynağının fermantasyon yolu ile alkole dönüştürülmesi işlemine biyoetanol denilmektedir. İçerisinde selüloz içeren bitkilerin selozik kısımlarının önce şeker sonrada etanole çevrilmesine de selülozik biyoetanol denilir. Etanol genellikle araçlarda direkt olarak kullanılmaktansa benzine karıştırılarak oktan sayısını arttırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Hatta bazı Avrupa ülkelerinde biyoetanolün petrol ürünlerine belli oranda karıştırılma zorunluluğu vardır.

Bitkisel ve hayvansal kaynaklı yağların çeşitli işlemlerden geçirilerek metil esterine dönüştürülmesine biyodizel denilmektedir. Bu işleme transesterleştirme de denilmektedir. Biyodizel, fosil yakıtlardaki dizelle aynı kimyasal özelliğe sahip değildir, ancak dizel motorlarda kullanılabilme özelliğinden dolayı ve biyokütle kaynaklı olmasından biyodizel denilmektedir. Biyodizel atık kızartma yağlarından üretilebildiği gibi pamuk yağı, palm yağı, ayçiçeği yağı, kolza, soya fasülyesi gibi bitkilerden de üretilebilmektedir. Bir ara ülkemizde çok yaygınlaşan biyodizel üretimi devletin vergi getirmesi ve üretim maliyetlerindeki artıştan dolayı şu günlerde popülaritesini yitirmiştir.

Bir diğer biyokütle kaynağından enerji üretme yöntemi olan ve 1920'li yıllarda keşfedilen Fischer-Tropsch sentezi katalizör varlığında hidrojen ve

karbonmonoksit gibi gazlar içeren sentez gazlarından hidrokarbon üretmektir. Fischer-Tropsch sentezi yakıtlar petrol yakıtları ile kıyaslandığında petrol dizeline göre daha az enerjiye sahip olduğu görülmektedir. Ancak, mevcut petrol dağıtım ağı altyapısı ile dağıtılabilir olması Fischer-Tropsch sentezi yakıtlarına avantaj getirmektedir. Ayrıca, bu yolla elde edilen yakıtlar herhangi bir motor sisteminde değişiklik yapılmadan kullanılabilmektedir [ÇAĞLAYAN ve ark., 2009].

Atıkların anaerobik fermantasyonu sonucu oluşan biyogaz üretim yöntemi ile hem atıkların çevresel açıdan olumsuz etkisinin azaltılması hem de beraberinde üretilen biyogazın enerji kaynağı olarak kullanılması açısından önemli bir bertaraf ve enerji üretim yöntemidir. Çoklu faydalara sahip bu yöntemin önemi git gide artmıştır ve yüksek bir ivmeyle artmaya devam etmektedir. Biyogaz organik yapıdaki atıklardan üretilebilirken aynı zamanda mısır, buğday, çimen gibi bazı enerji bitkilerinden de üretilebilmektedir.

Türkiye'deki atıkların ısıl değeri açısından bitkisel kaynaklardan yıllık yaklaşık 228 PJ, hayvansal kaynaklardan yıllık yaklaşık 60 milyon GJ potansiyele ve toplam 27 milyon hektar ekilebilen tarım alanına sahip olması hayvansal ve bitkisel atıklardan veya enerji bitkilerinden biyogaz üretim proseslerine olan ihtiyacı göz önüne sermektedir.

Şekil 1.2 Türkiye'deki hayvansal kaynaklı kullanılabilir atıkların illere göre dağılımı (milyon ton atık)

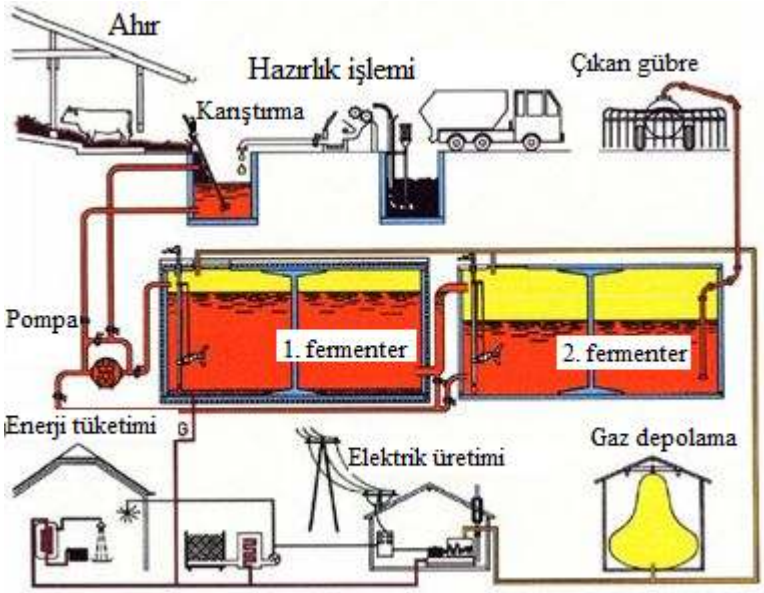
2. BİYOGAZ

Biyogaz, biyokütlenin havasız ortamda çeşitli bakteri gruplarının ortak faaliyetleri sonucunda çürütülmesi esnasında ortaya çıkan bir gazdır. Bu bakteri gurupları çürüyebilecek biyokütlenin içerisinde bol miktarda bulunabilmekte ve uygun ortam koşullarını bulduklarında aktif hale gelerek çürütme işlemini gerçekleştirmektedirler. Havasız çürütme için uygun ortam koşulları doğada özellikle yaz şartlarında kolayca sağlanabildiği için biyogaz doğada kendiliğinden oluşabilmektedir. Günümüzde kullandığımız doğalgaz da çok önceki zamanlarda toprak altında kalmış biyokütlenin biyogaza, oluşan biyogazın da uzun yıllar içinde doğalgaza dönüşmesiyle oluşmuştur.

Biyokütlenin biyogaza dönüşümü esnasında atıktan elde edilen enerjinin %10-12'si yeni hücrelerin üretiminde kullanılmakta iken, biyolojik olarak çözünebilen organik maddelerin %85-90'i metan ve diğer son ürünlere dönüştürülmektedir [MCCARTY, 1964].

Oksijensiz çürüme sonucunda biyogaz oluşurken beraberinde organik açıdan zengin gübre de oluşmaktadır. Dolayısıyla başlangıçta çevresel kirletici konumunda olan biyokütle, biyogaz gibi değerli bir gaza ve çevre dostu bir organik gübreye dönüşmüş olur. Ayrıca, biyogaz yanıcı bir gazdır ve bu özelliği sebebiyle bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilmektedir.

Biyogaz teknolojisi ile her türlü organik atık entegre tesislerde işlenerek enerji elde edilmekte, çevreye zarar verebilecek atıklar sterilize edilerek toprak ve su kirlenmesi engellenerek doğal denge korunmakta ve de tesislerde çıkan atık, bitkisel üretimde gübre olarak kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Genel olarak depo alanları, çürütücüler ve son depo alanları içeren bir biyogaz tesisinin işleyişi Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1 Biyogaz tesisi örnek akış şeması

2.1. Biyogaz Kullanımının Üstünlükleri;

- Çevre dostudur,
- Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır,
- Son ürünü organik açıdan zengin gübredir,
- Az maliyetli atık yönetimi imkânı sağlar,
- Kırsal kesimin gelişmesine olanak sağlar,
- Sera gazlarının salınımını azaltır,
- Endüstriyel gelişimle birlikte yeni istihdam alanları yaratır.

Artan dünya nüfusu ile birlikte doğru orantılı olarak oluşan atıkların miktarı ve enerji ihtiyacı da sürekli olarak artmaktadır. Oluşan atıkların çevresel açıdan oluşturduğu olumsuz etki sebebiyle bertaraf edilme zorunluluğu ve artan enerji talebi ile ortaya çıkan enerji darboğazı, her iki duruma çözüm teşkil edebilecek biyogaz üretim proseslerine olan ilgiyi git gide arttırmaktadır. Almanya, Çin, Hindistan, İngiltere, A.B.D, Fransa, Danimarka, Hollanda, İsviçre Filipinler, Nepal, Peru, Tanzanya, Kore, Zaire, Güney Afrika, Kolombiya gibi ülkeler biyogaz ile ilgilenmektedir ve bunlardan Almanya endüstriyel tesisler açısından başı çeken ülke konumundadır.

Biyogaz üretiminde son ürün konumundaki fermente gübre, azot ve potasyum gibi bitki besin elementlerince zengin olduğundan bitki gelişimini hızlandırmaktadır. Bitkisel ve hayvansal atıklarda azot, organik ve amonyum formunda bulunmaktadır. Oksijensiz çürütme sürecinde organik formdaki bu azotlar amonyum formuna dönüşür ve çürümüş atıklar amonyum formundaki azot yönünden zengin bir hal alır. Yapılan çalışmalarda, bitkisel ve hayvansal atıkların biyogaz üretilmeden stabilleştirildiği bir diğer sistem olan kompostlaştırma sonucunda çıkan gübreye nazaran oksijensiz çürütme sonucu ortaya çıkan fermente gübrenin azot yönünden yaklaşık olarak üç kat daha zengin olduğu belirtilmektedir [ARNOTT, 1985]. Fermente gübrenin ham gübreden daha yararlı olması da toprakta amonyum formundaki azotun organik forma göre daha kolay serbest kalması şeklinde açıklanmaktadır. Ayrıca, yapılan bazı araştırmalarda son ürün olan gübrenin kullanımı ile topraktaki besleyici madde miktarının % 6-10 oranında artığı, uzun süreli deneylerde ise toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kayda değer ölçüde iyileştiği tespit edilmiştir. Fermente gübrenin fosfor eksikliğinin giderilmesi durumunda ise hasat verimlerinde %20'nin üzerinde artışlar kaydedilmiştir. Bunlara ek olarak son ürün olan gübre temel bitki besin maddelerinin yanında, kalsiyum, sülfür, magnezyum, bakır, çinko ve manganez gibi bitki gelişiminde olumlu etkiye sahip elementleri de içermektedir [MARCHAİM,1992]. Bu gübrelerin kullanımı toprak besleyiciliğinin yanında kimyasal gübre kullanımını azaltarak ülke ekonomisine fayda sağlama, toprak erozyonlarının oluşumunu önleme, toprağın havalanmasını sağlama, pH tamponlama kapasitesini arttırma ve toprağın su tutma kapasitesini arttırma gibi birçok faydalı etkiye sahiptir.

Biyogaz sistemlerinin kullanımının artmasıyla doğal çürüme yoluyla koku oluşumunun azalması, zararlı otların oluşumunun azalması, patojenik bazı bakterilerin bu yolla ölmesi gibi çevre ve su kirliliğini önleme faaliyetleri de kendiliğinden oluşmaktadır. Özellikle yaz aylarında büyük çiftliklerin depo alanlarında oluşan kötü kokuların önüne bu yolla geçilebilmektedir. Yine mezofilik ve termoflik şartlarda çalıştırıla biyogaz sistemleri ile hayvansal gübreler yoluyla toprağa karışan bazı patojenlerin yok edildiği bilinmektedir. Lusk çürütücü öncesi ve sonrası bazı mantar ve sporların koloni sayılarını

sayarak yaptığı çalışmalarda koloni sayılarında mezofilik ve termofilik çalışma bölgelerinin her ikisinde de belirgin düzeyde düşüş olduğunu gözlemlemiştir [LUSK,1998]. Marchaim'in yaptığı bir başka çalışmada ise potojenlerin sayılarında oluşan düşüşün mezofilik şartlarda % 95, termofilik şartlar da %99.8 oranlarında olduğu belirtilmiştir [MARCHAİM,1992].

Biyogaz sistemlerinin bir başka faydası da kırsal kesimlerin kalkınmasını sağlamak ve yeni istihdam alanları oluşturarak ekonomiye katkıda bulunmaktır. Kırsal bölgelere yapılan biyogazdan elektrik üretim santrallerinin bu bölgelere teknolojik yatırımları beraberinde getirdiği, bu bölgelerin kalkınmalarına katkıda bulunarak eğitim ve kültür düzeylerinin artmasını sağladı bilinmektedir. Ayrıca, gelişi güzel gübre kullanımının getirdiği zararların farkındalığını arttırarak o bölgelerdeki çiftçilerin bilinçlenmeleri sağlanmaktadır. Bu tesislerde çalışacak kişilerin işe alımı ile de yeni istihdam alanları yaratılmaktadır. Bu yolla geçtiğimiz yıl itibariyle sadece Almanya'da kurulu bulunan yaklaşık 4.000 adet biyogaz tesisinde yaklaşık 10.000 kişi iş imkanı bulmuştur.

2.2. Biyogaz İçeriği

Biyogaz yüksek oranda Metan (CH_4) ve Karbondioksit (CO_2) içermektedir. Bu gazların biyogaz içerisindeki oranı yaklaşık olarak %98- 99 oranında olmaktadır. Biyogaz, Metan ve Karbondioksite ilave olarak eser miktarda da olsa Hidrojen Sülfür (H_2S), Azot (N_2), Oksijen (O_2), Karbon monoksit (CO) ve Hidrojen (H_2) gibi gazlarda bulunabilmektedir.

Şekil 2.2 Organik maddeden biyogaz üretim akışı

Biyogaz içeriğindeki yanıcı nitelikteki yüksek metan ihtivası biyogaza enerjik nitelik katmaktadır. Alkan grubunun ilk bileşiği konumundaki metan doğalgaz bileşiminde de bulunan önemli bir yakıttır. Normal şartlar altında gaz halindedir ve kokusuzdur. Metan karbondioksite göre yaklaşık 20 kat daha fazla sera gazı etkisine sahip olduğundan dolayı çevre açısından da salınımı önem arz eder.

Biyogaz yapısındaki karbondioksit zararsız bir gazdır. İnsan solunumu ile de ortaya çıkan karbondioksit bitkilerin fotosentezi ile doğada dengelenmektedir. Çevre açısından önemli olan bu dengenin bozulmamasıdır.

Biyogaz içinde bulunan bir diğer önemli gaz ise hidrojen sülfürdür. Oksijensiz solunum dahilinde hammaddelerin protein yapılarından kaynaklanan hidrojen sülfür biyogaz içerisinde yüksek oranlarda çıkmasa da zehirli yapısı nedeniyle dikkat edilmesi gereken bir gazdır. Havasız ortamlarda 50 ppm'lik bir hidrojen sülfür dahi öldürücü olabilmektedir. Entegre biyogaz tesislerinde zaman zaman 5000 ppm seviyelerine çıkabilen hidrojen sülfür ayrıca, ortamın nemi ile birleşerek kuvvetli bir asit olan hidroklorik aside dönüşüp boru hatlarına veya kullanılan diğer ekipmanlara zarar verebilmektedir. Bu sebeple biyogaz içerisinden çeşitli yöntemler kullanılarak ayrıştırılmaktadır.

2.3. Biyogaz Üretimi İçin Kullanılabilecek Hammaddeler

Biyogaz üretimi için organik yapıdaki çürüyebilen maddeler kullanılabilmektedir. Genel olarak biyogaz hammaddeleri 3 sınıfa ayrılabilmektedir;

1-) Tarımsal faaliyetlerle ortaya çıkanlar;

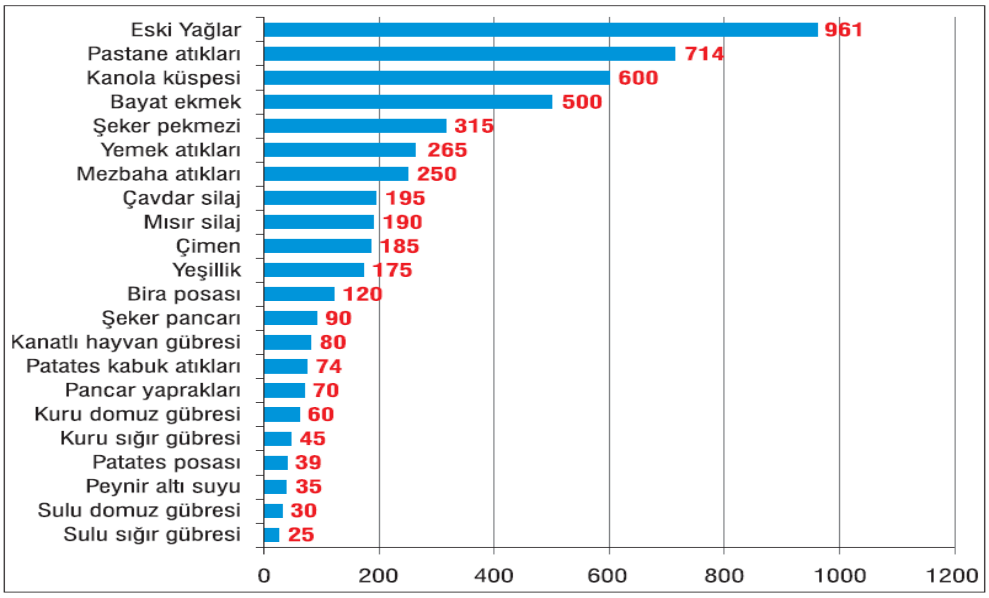
- Bitkisel atıklar: buğday, darı, yulaf, mısır, çavdar, şekerpancarı gibi bitkilerin atıkları

- Hayvansal atıklar: bireysel veya çiftliklerde yetiştirilen büyükbaş, küçükbaş, kümes hayvanlarının dışkıları

2-) Endüstriyel atıklar: Et, süt, gıda endüstrilerinden çıkan atıklar, mezbaha atıkları, meyve ve sebze endüstrisi atıkları, peynir altı suyu, purina vs...

3-) Evsel organik atıklar: evsel meyve sebze atıkları, yemek atıkları vs..

Kullanılan hammadeye göre elde edilen biyogaz miktarları değişiklik göstermektedir. Bunun sebebi hammaddeler içerisindeki biyolojik olarak çürüyebilirliğe sahip bileşiklerinin değişik oranlarda dağılmasıdır. Bazı maddelerin biyogaz potansiyelleri Şekil 2.3'teki gibidir [9].



Şekil 2.3 Madde bazında biyogaz üretim miktarları (m^3 biyogaz/ton hammadde)

Biyogaz üretiminde kullanılabilecek maddelerin biyogaz potansiyel araştırmaları geçmişten günümüze birçok araştırmacı tarafından yapıla gelmiştir. Bu çalışmalara örnek verilecek olursa; Kalia ve Singh beç sistemde sığır gübresi kullanarak yaptığı çalışmada 20-23 ^{o}C'de 15 haftalık denemeler yapılmış ve deneme sonuçlarında gaz üretiminin kg kuru madde

başına 103 l/kg.km olduğu tespit edilmiştir. Bu denemede oluşan biyogazın metan yüzdesi %55-60'tır. Aynı araştırmacılar saf sığır gübresi yerine sığır gübresine %10 fermente olmuş biyogaz tesisinden alınan materyal eklediklerinde gaz üretiminin kg kuru madde başına 159 l/kg.km olduğunu ve biyogazın metan yüzdesinin değişmediğini bulmuşlardır. Bu çalışma sonucunda hammaddeye aşı eklenmesinin biyogaz oluşum hızını ve oluşan biyogaz miktarını artırdığı ortaya çıkmıştır [KALIA,2001]. Bujoczek ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışma ise aşı maddesi olarak aktif çamurun kullanılması durumunda biyogaz oluşum hızının ve üretilen biyogaz miktarının ne gibi etkileneceği üzerinedir. Denemeler sırasında taze tavuk gübresine dış ortamda fermente olmuş tavuk gübresi ve fermente olmuş aktif çamur karışımı materyal olarak kullanılmıştır. 35 ^{o}C'de 119 gün süren denemeler sonucunda fermante çamur ilavesinin metan üretimini arttırdığı tespit edilmiştir. Denemelere ait sonuçlar Tablo 2.1'te verilmiştir [BUJOCZEK ve ark.,2000].

Tablo 2.1 Tavuk gübresi ve fermante çamuru denemesi sonuçları

Malzeme	**Kuru madde (%)**	**CH_4 (ml/g.okm)**
TG (%100, sulandırılmamış)	21.7	13
TG (%100, sulandırılmış)	10	283
TG (%100, sulandırılmış)	5	548
%90 TG+%10 FTG (sulandırılmamış)	20.7	23
%40 TG+%60 FTG (sulandırılmamış)	15.7	256
%90 TG (sulandırılmış) + %10 FTG	10.9	378
%90 TG + %10 FÇ (sulandırılmamış)	19.8	22
%40 TG + %60 FÇ (sulandırılmamış)	10.3	473
%90 TG (sulandırılmış) + %10 FÇ	10	335
%100 FTG	11.7	436
%100 FÇ	2.7	534

TG= Taze tavuk gübresi, FTG= Fermente tavuk gübresi, FÇ= Fermente çamur

Yaldız yapmış olduğu çalışmada 5 litre hacme sahip batch tipi üreteçlerde 20-24 ^{0}C fermantasyon sıcaklığında %6.72-6.89 kuru madde içeriğinde sığır gübresinde; fermente olmuş gübreden 0.244 l/l.d, %65 metana sahip biyogaz, %33 fermente gübre+%66 taze gübreden 0.472 l/l.d % 66.4 metana sahip biyogaz ve %33 fermente gübre+%66 taze gübre+200 gram kıyılmış saman karışımından 0.596 l/l.d %70 metana sahip biyogaz elde etmiştir. Aynı çalışmada tavuk gübresinde; fermente olmuş gübreden 0.32 l/l.d %56 metana sahip biyogaz, %33 fermente gübre+%66 taze gübreden 0.65 l/l.d % 57.3 metana sahip biyogaz ve %33 fermente gübre+%66 taze gübre+200 gram kıyılmış saman karışımından 0.82 l/l.d %62.2 metana sahip biyogaz elde etmiştir [YALDIZ,2004].

Kentsel atıklar veya yağ atıkları üzerine yapılan bazı çalışmalarda da sırasıyla şu gibi sonuçlar elde edilmiştir. D. Elango ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada katı kentsel atıklar ile beraber evsel lağım atıklarının ortaklaşa kullanılması ile günlük maksimum metan üretimi 0.36 m^3/kg ve sisteme en uygun sıcaklık aralığının 26-36 ^{o}C olduğu saptanmıştır [ELANGO ve ark.,2007]. Kentsel katı atıklar üzerine yapılan başka bir çalışmada Fernandez, farklı karışımlardaki kentsel katı atıkların organik kısımları ile atık yağların birlikte incelemiştir. Deneyler, mesofilik (37°C) şartlar altında, yarı sürekli olarak işletilen ve çalışma kapasitesi 14 lt olan pilot tesiste hidrolik bekleme süresi 17 gün olarak seçilerek gerçekleştirilmiştir. Atıklar reaktöre 6 saatte bir olmak üzere günde 4 kez beslenmiştir. İlk etapta reaktör beslenirken organik katı atıklarla birlikte hayvansal yağlar kullanılırken daha sonraki çalışmalarda hayvansal yağlar yerine bitkisel yağar kullanılmıştır. Reaktöre beslenen atıkların yağ içeriğinin artırıldığı zaman biyogaz içerisindeki CH_4 miktarında da artış olduğu görülmüştür [FERNANDEZ ve ark.]. Bu sonuçla biyogazdan yenilenebilir enerji kaynağı oluşturmak üzere katı atıklarla yağların birlikte değerlendirilmesinin uygun bir teknoloji olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Hutnan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada şeker pancar pulpu kullanmışlardır. Şeker pancar pulpu şeker üretiminde elde edilen genel olarak selüloz hemiselüloz ve pektin içeren bir maddedir. Avrupa Birliği ülkelerinde

yılda yaklaşık 100 milyon ton şeker pancarı üretilmektedir. Bu ülkelerde şeker pancarı pulpu sığır üreticileri tarafından yem olarak kullanıldığı gibi ayrıca yeraltı çöp gazı (landfil gaz) üretiminde de kullanılmaktadır. Diğer taraftan 1 ton şeker pancarından 250 kg preslenmiş pulp elde edilebilir ve bu ürünün nem içeriği 75-80 civarındadır. Şeker pancarı pulpunun kuru madde oranı %90, organik kuru madde oranı %81, pH değeri 4 olarak tespit edilmiştir. Denemede iki fazlı üreteç 35 ^{o}C sıcaklıkta çalıştırılmıştır. Metan üreteci 4 litre hacme sahiptir. Materyalin pH değerini artırmak için 1 gram kuru şeker pancarı pulpuna 0.02 gram $NaHCO_3$ solüsyonu karıştırılmıştır. Materyal burada 4 gün bekletildikten sonra metan üretecine verilmiştir. Deneme sonucunda toplam 801.59 litre biyogaz üretilmiştir. Bu sonuca göre 1 gram kuru şeker pancarı pulpundan %71.9 metan içeriğine sahip, 485.8 mililitre biyogaz elde edilmiştir [HUTNAN ve ark, 2001].

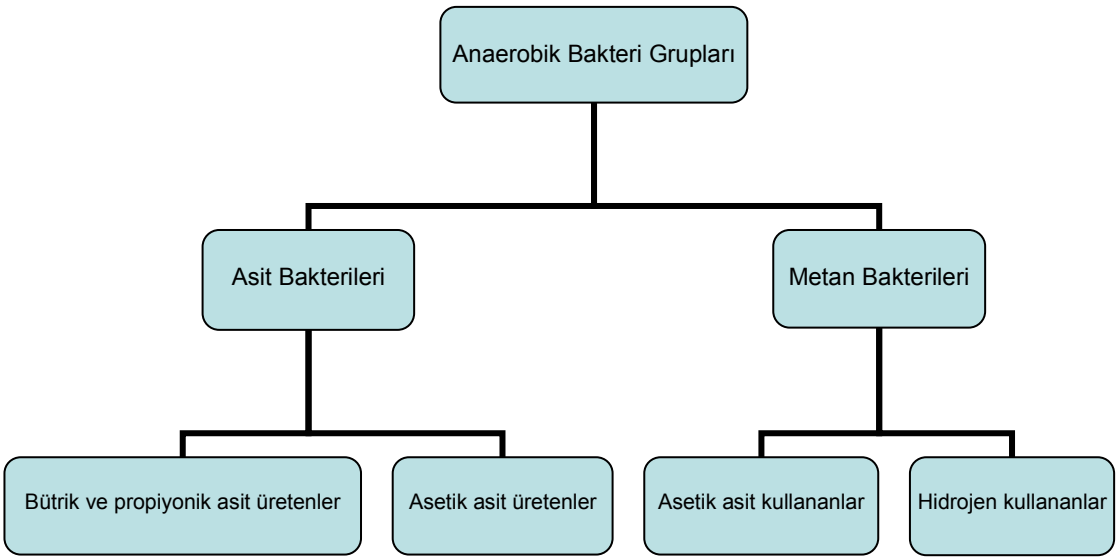
Tablo 2.2 Çeşitli zirai ürünlerin biyogaz potansiyeli

Ürünler	**Metan potansiyeli ($l.CH_4$/ kg.okm)**
Buğday	384-390
Arpa	356-360
Kolza	336
Mısır	397-410
Kaba Yonca*	340 - 410
Yonca**	350
Yeşil şua çimi	390
Silaj şua çimi	409
Yemlik sorgum	295
Dane sorgum	372
Tatlı sorgum	352
Pancar	456
Patates	276
Kolza	340
Çavdar çimi	410
Karalahana	255

Zirai ürünlerin biyogaz üretiminde kullanılması konusunda Pouech ve arkadaşları beç sistemde 500 cc hacimli cam şişelerde (erlenmayer) bir çalışma yapmışlardır. Şişe içindeki materyaller 150 min-1 ile karıştırılmıştır. Materyaller içerisine 20 gram aşılama materyali konulmuştur. Elde edilen veriler Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu verilere ek olarak bitkisel materyallerin olgunluğunun da biyogaz üretimine etkisi olduğu saptanmıştır [POUECH ve ark., 2000].

2.4. Biyogaz Üretim Aşamaları

Biyogaz üretimi 4 temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; hidroliz, asit oluşumu, asetik asit oluşumu ve metan oluşumu aşamalarıdır. 1800'lü yıllardan başlayan çalışmalar akabinde 1950'li yıllarda bu aşamalarda bakterilerin rol aldığı anlaşılmıştır. Bu bakteriler ise ayrıntılı olarak Şekil 2.4' te verildiği gibi 2 ana grupta sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.4 Anaerobik bakteri grupları [ÖZTÜRK, 1999]

2.4.1. Hidroliz Aşaması

Hidroliz aşaması oksijensiz çürümenin ilk aşamasıdır. Bu aşamada hammaddeler içerisindeki karbonhidrat $(C_{10}H_{10}O_5)_n$, yağ $(C_50H_{90}O_{10})$ ve protein $(10C_2NH_3\ 3H_2O)$ gibi büyük moleküllü yapılar daha küçük yapı

taşlarına parçalanırlar. Hidroliz esnasında hücre dışı enzimler faaliyet içerisinde olduğundan dolayı yavaş ilerleyen bir süreçtir. Kimi araştırmacılara göre bu aşama oksijensiz çürütme için hız sınırlayıcı aşamadır. Büyük moleküllü yapılar içerisinde selülozik yapıların hidrolizi diğer karbonhidrat ve protein yapılara göre daha uzun sürmektedir. Lignin gibi kompleks yapıdaki bileşiklerin hidrolizi ise hemen hemen yok denecek kadar azdır. Ligninin çok küçük bir miktarı hidroliz olsa dahi çok uzun süreler gerektirmektedir.

2.4.2. Asit Oluşum Aşaması

Hidroliz aşamasıyla birlikte yürüyen bir fazdır. Hidroliz aşamasında parçalanan hammaddeler bu aşamada asit bakterileri tarafından organik asitlere dönüştürülürler. Bu organik asitler; propiyonik, butirik, izobutirik, valerik ve izovalerik asit gibi asitlerdir. Bu aşama için reaktör içindeki hidrojen basıncı önemli bir parametredir. Hidrojen basıncının 10^{-4} atmosferi aşması durumunda butirik ve propiyonik asit oluşumu hızlanır ve ortam pH'ı şiddetli bir şekilde düşerek inhibasyona neden olmaktadır [MC CARTY]. Asit oluşum fazı diğer aşamalara göre daha hızlı yürüyen bir faz olduğu için oksijensiz çürütme prosesleri için kontrol edilmesi önem arz eden bir aşamadır. Asit oluşum fazının hızlanması ile proses içindeki asit oluşum ve tüketim dengesi bozularak süreç inhibasyona doğru gidebilmektedir.

2.4.3. Asetik Asit Oluşum Aşaması

Asetik asit oluşum fazında bir önceki fazlarda oluşan organik asitler tek karbonlu asit olan asetik asite dönüştürülürler. Bu aşamada asetojenik (asetik asit üreten) bakteri grupları faaliyet göstermektedir. Bir kısım asetojenik bakteriler uçucu yağ asitlerini asetik asit ve hidrojene dönüştürmektedirler.

$$CH_3(CH_2)_n\ COOH + H_2O \Rightarrow 2CH_3\ COOH + 2H_2$$

Diğer bir kısım asetojenik bakteri grubu ise, açığa çıkan karbondioksit ve hidrojeni kullanarak asetik asit oluşturur. Ancak bu ikinci yolla oluşan asetik asit miktarı, birinciye oranla daha azdır.

$$2CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_3COOH + 2H_2O$$

2.4.4. Metan Oluşum Aşaması

Metan oluşum aşaması oksijensiz çürütmenin son aşamasıdır. Asetik asit ve hidrojen kullanan bakteriler tarafından metan oluşturulmaktadır.

$$CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$$

$$CH_3COOH \Rightarrow CH_4 + CO_2$$

Oksijensiz çürütme proseslerinde oluşan metanın yaklaşık %70'i asetik asitten %30'u ise hidrojen ve karbondioksitten üretilmektedir.

Metan bakterileri ortam koşullarından en çok etkilenen bakterilerdir. pH 6'nın altına düştüğünde metan üretimi durmaktadır. Bu sebeple metan üretim sürecinde üreteç içi pH'ın 6.7-8.0 aralığında tutulması esastır. Ayrıca, metan bakterileri ortam sıcaklığının değişimlerinden de en çok etkilenen bakteri grubudur. Oksijensiz çürütme proseslerinde belli bir sıcaklık aralığı seçilmeli bu sıcaklık aralığı oldukça dar tutularak sıcaklık dalgalanmalarına izin verilmemelidir.

Metan oluşum aşaması da hidroliz aşaması gibi yavaş bir süreç olarak bilinmektedir. Hidroliz aşaması gibi metan oluşum aşaması da zaman zaman hız belirleyici aşama olabilmektedir [ÖZTÜRK, 1999].

2.4.5. Biyogaz Üretimini Etkileyen Parametreler

Biyogaz üretimini etkileyen parametreler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- Hammaddeye bağlı parametreler;
  - Hammadde cinsi
  - Hammadde miktarı
  - Karbon/azot (C/N) oranı
  - Kuru madde miktarı

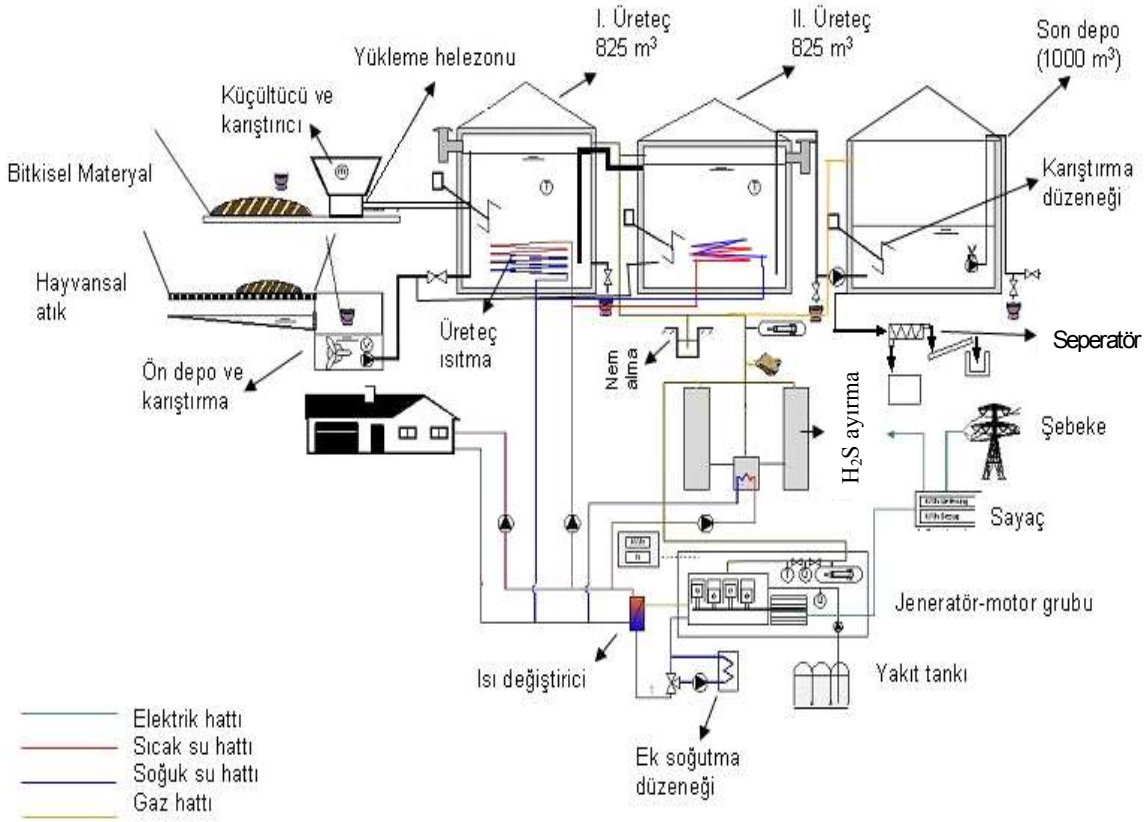
- Prosese bağlı parametreler;
  - Ortam asitliği (pH)
  - Fermantasyon süresi
  - Ortam sıcaklığı
- Tesis tipine bağlı parametreler
  - Partikül büyüklüğü
  - Tesis tipi

Bu parametrelerden ortam sıcaklığı, metan gazı oluşumunda en önemli etmendir. Daha önceden bahsedildiği gibi metan oluşturan bakteriler ani sıcaklık değişimlerinden, gündüz-gece sıcaklık farklılıklarından çok çabuk etkilenir. Bu nedenle, sıcak bölgelerde kurulan ev tipi biyogaz tesislerinin başarısı daha yüksek olmaktadır. Entegre tesislerde ise reaktör içerisine döşenmiş ısıtma boruları veya ısı değiştiriciler ile sıcaklık kontrolü yapılmaktadır.

Karbon ve azot oksijensiz ortam bakterilerinin en önemli besin maddeleridir. Bu bakteriler, karbonu enerji kaynağı olarak kullanırken, azotu yeni hücreler oluşturabilmek için kullanmaktadırlar. Biyogaz oluşumu sürecinde karbon, azota kıyasla 25/30 kat daha fazla kullanıldığından dolayı prosesler için ideal karbon/azot oranı 30/1olarak bilinmektedir. Bu oran; buğday sapında 87/1, mısır sapında 53/1 ve hayvan dışkısında ise 29/1'dir. Bu hammaddelerin değişik oranlarda ve başka hammaddeler ile karıştırılarak kullanılmasıyla C/N oranı ayarlanmaktadır [YALDIZ,2004].

3. BİYOGAZ SİSTEMİ MODEL BÜYÜKLÜKLERİ

Genel olarak bir biyogaz sistemi ön depolar, hammadde besleyiciler, fermantör veya fermantörler, gaz temizleme ve besleme üniteleri, gazı enerjiye dönüştürme sistemi ve nihai ürün deposundan oluşmaktadır. Tez kapsamında temel alınacak proses şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Biyogaz üretim proses şeması

Şekil 3.1'de verilen şemada oluşan biyogaz bir kojeneratör ünitesi ile elektriğe dönüştürülerek değerlendirilmektedir. Kojeneratörde üretilen elektrik şebekeye verilmekte ve yanma sonrası kazanılan ısı ise çevredeki binaların ısı ihtiyaçlarını karşılamakta kullanılabilmektedir. Ayrıca tesis Kocaeli ilinde olduğundan dolayı tasarımlar Kocaeli iline ait verilere göre tasarlanmıştır.

3.1. Biyogaz Sistemi Tasarım Büyüklükleri

Simülasyonu yapılacak biyogaz sisteminde hammadde olarak hayvansal atıklar ve bitkisel atıklar birlikte kullanılacaktır. Sistem bu hammadde çeşidine göre tasarlanmış ve tasarım büyüklükleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda günlük 19 ton hammadde ve kuru madde oranını ayarlamak için 30.64 ton su kullanılacaktır. Hesaplanan ve kullanılacak olan biyogaz tesisi büyüklükleri ayrıntılı olarak Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1'den anlaşılacağı üzere tesisin toplam hacmi 1650 m^3 olarak planlanmıştır. Her biri 825 m^3 net hacme sahip olan 2 adet fermantör bir biri ile yapı olarak aynı ama iki ayrı üreteç şeklinde dizayn edilmiştir. 825 m^3 net hacme %10 kadar gaz depolama hacmi eklenecekti. Oluşan iki ayrı tesis üreteç maliyetinde %38'lik bir artışa neden olmasına rağmen, üreteçlerin birisinde arıza durumunda duran üretim diğerinde devam edebileceği ve fermantörler içindeki bakteriyel faaliyete göre gerektiğinde paralel veya seri çalıştırabilme esnekliği sağladığı için tercih edilmiştir. Fermantörler, depo alanları gibi tesis bileşenlerinin tümü beton malzemeden oluşmaktadır. Fermantasyon sabit sıcaklıkta gerçekleşmesi gerektiğinden dolayı fermantörler içerisindeki sıcaklığı kontrol edebilmek için iç ısıtıcılar ve dış izolasyon mevcuttur. Fermantörler içinde homojenizasyon önemli bir unsur olduğundan dolayı fermantörler ikişer adet karıştırıcı ihtiva etmektedir. Fermantörlerde oluşan gaz, sıvı kısmın üzerinde bırakılan boşukta ve üst kısma monte edilen esnek gaz depolama membranında depolanacaktır.

Hammaddesi bitkisel ve hayvansal atıklar olan bu biyogaz tesisi minimum 250 kW elektrik üretme kapasitesindedir. 250 kW elektriğin yanında 250 kW ısıda üretilmektedir. Yaklaşık 80 kW'lık bir enerjide çeşitli kayıplarla tüketileceği düşünülmektedir.

Tablo 3.1 Biyogaz tesis büyüklükleri

Materyal Miktarı	7 000 ton/yıl
Günlük yüklenecek miktar	19.0 ton/d
Yükleme oranı	3 kg okm/m3.d
Bekleme Süresi	30-40 gün
Organik kuru madde oranı	%9-12
Fermentasyon sıcaklığı	35-45 0C
Toplam hacim	1650 m3 (825 m3x2)
Elektrik üretimi	2 267 000 (kWh/yıl)
Isı üretimi	2 267 000 (kWh/yıl)
Toplam kojeneratör verimi (elektrik+ısı)	%85
Üreteçlerin çapı	13.3 m.
Üreteçlerin yüksekliği	6.34 m.
Ön depo hacmi	9.18 m3
Duvar kalınlığı	0.16 m.
İzolasyon	10 cm. Styrodur
Taban betonu	C25/30, su geçirmez, 18 cm. kalınlık, ısı izolasyonlu, Polystyrol-köpük 6 cm.
SON DEPO	
Hacim Çap Yükseklik Duvar kalınlığı Taban betonları Karıştırıcı Üreteç karıştırıcı	1000 m^3 13 m. 7.6 m. 0.16 m. 1 m. Mikser tipi, dönü sayısı 450 min^{-1}, gücü 15 kW, Elektrik motoru ve şanzıman, 15-20 kW, çap ca. 1.5 m.,dönü sayısı ca 20 min^{-1},
GAZ DEPOSU	
(Dış membran) İç membran	Dayanım sıcaklığı -30-+ 70 0C Kar yükü 75 kg/m2 Renk Koyu Gri Üst kısım PE Folye ile kaplı Dayanım sıcaklığı -30 +70 0C, maksimum basınç +/-2 mbar, gaz depolama hacmi 1000 m3, ağırlık 860 g/m2,
MOTOR BÜYÜKLÜKLERİ	
Bitkisel atık karıştırma	30 kW
Seperatör	6 kW
Ön depo karıştırma	5 kW
Hayvansal atık yükleme	9 kW
Bitkisel atık yükleme	9 kW

3.2. Kocaeli İline Ait İklim ve Yer Bilgileri

Kocaeli Meteoroloji İl Müdürlüğünden alınan iklim verileri aylık ortalama sıcaklık, tesisin kurulacağı ile ait aylık en yüksek ve en düşük sıcaklıklardan hesaplanarak Tablo 3.2'de sunulmuştur. Bu tablodaki veriler 2006 yılının verileridir. Kocaeli'nin boylam ve enlemi sırasıyla, 40.47 N, 29.50 E' dir. Rakım ise yaklaşık 76 m'dir.

Tablo 3.2 İklim verileri.

Aylar	**Ocak**	**Şubat**	**Mart**	**Nisan**	**Mayıs**	**Haziran**	**Temmuz**	**Ağustos**	**Eylül**	**Ekim**	**Kasım**	**Aralık**
Tmax (^oC)	7.81	10.04	15.09	19.21	23.65	27.77	29.4	33.27	25.59	20.63	14.83	11.6
Tmin (^oC)	1.86	3.14	5.69	9.35	12.99	17.66	19.04	21.23	16.61	14.1	7.21	4.69
u_∞ **(m/s)**	1.16	1.58	1.68	1.69	1.51	1.7	1.61	1.61	1.38	1.09	1.47	0.94
a*	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.5	0.6	0.6

T_{max}:ay içinde tespit edilen en yüksek sıcaklık
T_{min}: ay içinde tespit edilen en düşük sıcaklık
u_∞ : ay içinde tespit edilen ortalama rüzgar hızı
a: Gökyüzü bululuk durumunu ifade etmek için kullanılan katsayısı. 0.9 = çok açık; 0.8 = kısmen bulutlu; 0.7 = büyük bir kısmı bulutlu; 0.6 = sisli; 0.5 = güneş görülmeyecek kadar kapalı

3.3. Tesiste Kullanılacak Hammadde Bilgileri

Bu çalışma kapsamında, hayvansal atıklar ile bitkisel atık kofermentasyonu gerçekleştirilecektir. Kofermantasyon iki farklı tür atığın birlikte fermantasyonudur. Hayvansal atık olarak, besi sığırı gübresi (cattle manure), süt sığırı gübresi (dairy manure), işkembe içi atığı, yumurta tavuğu (poultry manure), etçi tavuk gübresi (broiler manure), kullanılması

planlanmaktadır. Bitkisel materyal olarak ise sebze ve meyve atıkları (hal atıkları), bozulmuş silaj, saman, mısır slajı, vb. kullanılacaktır. Ancak, atık çeşidinin çok olması, fermentörlere beslenecek olan hammaddenin bileşiminin sürekli olarak değişeceği anlamına gelmektedir. Bu sebeple modellemede bir hayvan gübresi ve bitkisel materyal seçilmiştir. Hayvansal gübre olarak Tablo 3.3'te verilen tavuk gübresi, bitkisel materyal olarak ise Tablo 3.4'te verilen atıklar dikkate alınarak kullanılacaktır. Modellerde kullanılacak olan materyallerin kimyasal özellikleri literatür bilgilerinden toplanmıştır. Karışımın elemental analizi literatürden alınmış değeriyle $C_{22.26}H_{36.23}O_{15.95}N$ şeklindedir [EKİNCİ, 1997]. Karışımda ayrıca %0.2 oranında Klor (Cl) ve % 0.18 oranında Kükürt (S) bulunmaktadır. Karışımın materyalinin nem içeriği yaş baz olarak yaklaşık %75 olarak alınacaktır. Bitkisel ve hayvansal materyal karışımının birim ağırlığı 1200 kg ve karışımın özgül ısı kapasitesi ise 1.4 kJ/kg K dir [EKİNCİ, 1997].

Tablo 3.3 Modelleme çalışmalarında kullanılacak olan hayvansal atıkların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Ölçülen değer	**Birimi**	**Yumurtacı tavuk gübresi**	**Yumurtacı tavuk gübresi**	**Etçi tavuk gübresi**	**Besi sığırı gübresi**	**Besi sığırı gübresi**
TKM	%	20-47	31.2	73.6	6.7	16.9
UM	% TKM	60-76	26	87.7	79.9	83.2
KOİ	(g kg-1)	-	-	1244	74.5	1237.5
TKN	% TKM	4.6-6.7	24.3e	12.4f	-	4.5**
NH4-N	(mg L-1)	3090	380	-	-	
Protein	% TKM	-	15.2	-	16.9	
Lipit	% TKM	1.5-2.1	10	-	5.3	
Metan potansiyeli	m3/kg VS	0.2-0.3	0.1-0.5	-	-	
Referans		**[20]**	**[21]**	**[22]**	**[23]**	**[23]**

Tablo 3.4 Modelleme çalışmalarında kullanılacak olan bitkisel atıkların kimyasal özellikleri [BUFFİERE, 2006].

Ölçülen değer	Birimi[a]	Salata	Havuç	Çim	Patates	Muz	Elma	Portakal
TKN	g N/g	0.002	0.003	0.007	0.004	0.004	0.006	0.009
KOİ	g O2/g	0.127	0.170	0.382	0.228	0.166	0.228	0.294
Protein	g/g	0.017	0.025	0.040	0.016	0.011	0.021	0.037
Lipit	g/g	0.007	0.006	0.018	0.006	0.005	0.004	0.008
Şeker	g/g	0.023	0.057	0.070	0.108	0.049	0.086	0.102
Selüloz ekstartı	g/g	0.054	0.094	0.108	0.115	0.067	0.142	0.182
Hemiselüloz	g/g	0.014	0.010	0.097	0.053	0.015	0.005	0.010
Selüloz	g/g	0.011	0.009	0.041	0.007	0.008	0.008	0.017
Lignoselüloz	g/g	0.008	0.007	0.022	0.003	0.019	0.013	0.009
Karbondidrat	g/g	0.087	0.121	0.267	0.178	0.109	0.167	0.218
TP[b]	g/g	-	0.00073	0.00213	0.00072	0.00033	0.00059	0.00102

[a]: Taze materyal, [b]: Toplam fosfor.

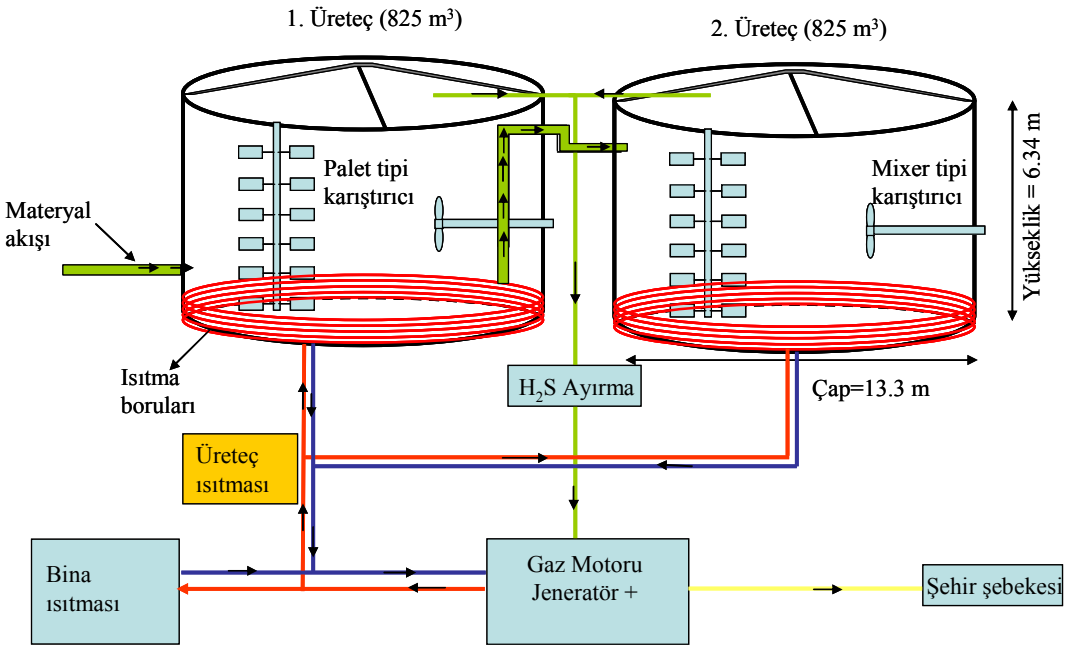
3.4. Model ve Tesis İşletim Bilgileri

3.4.1. Modellere Ait Bilgiler

Anaerobik fermantasyonun gerçekleştiği fermantörlerin simülasyonunda ADM 1, biyogazın elektriğe dönüştürüldüğü kojeneratör sisteminin simülasyonunda HYSYS programları bu programların entegrasyonunda ise IPSEpro modellemeleri kullanılmıştır. ADM 1 modellemesinde fermantör

içerisindeki fizikokimyasal ve biyokimyasal işlemler simüle edilmektedir. Enerji dönüşüm sistemlerinin simülasyonunda kullanılan HYSYS programında ise gaz motorunun farklı metan yükleme oranlarında motorun performansına olan etkileri incelenecektir. IPSEpro modellemesinde ise biyogaz üretim sistemi ile enerji dönüşüm sisteminin birlikte çalışması sağlanacaktır.

Genel akış şeması Şekil 3.1'de verilen biyogaz üretim tesisinin basitleştirilmiş akış şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Modellemede kullanılan biyogaz akış şeması

Akış şemasında gösterildiği gibi fermantörlere hammadde besleyişleri birer noktadan olacak şekilde düzenlenmiştir. Yine gaz çıkışları birer noktadan olmakta ve bu çıkışlar daha sonra birleşerek enerji dönüşüm sistemine gitmektedir.

3.4.2. Tesis İşletim Bilgileri

Hammadde olarak kullanılan bitkisel ve hayvansal atıklar yükleme miktarı 19 ton/gün olacak şekilde biyogaz sistemine beslenecek şekilde tasarlanmıştır. Ham maddenin kuru madde oranı yaklaşık olarak %25'tir.

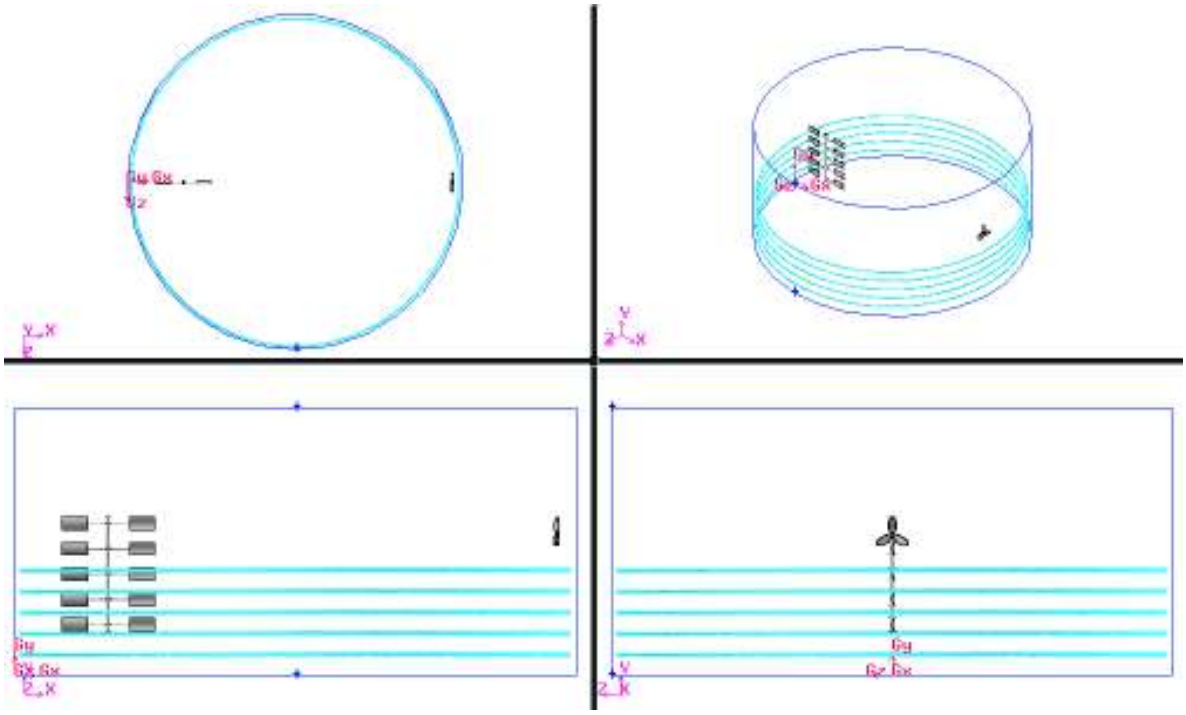
Fermentörlerin içerisinde bulunacak materyalin toplam kuru madde oranı yaklaşık olarak %11 olacaktır. Bu oranı sağlayabilmek için günde 30.64 ton su ilavesi yapılmalıdır. Bu su yüklemesine karşılık gelen yükleme oranı ise güblük 2.88 kg organik kuru maddedir (OKM/m^3). Tesisin çalışma sıcaklığı için mezofilik koşullar dahilinde yaklaşık olarak 35°C olarak seçilmiştir ve simülasyon çalışmalarında sıcaklığın sistem performansı üzerine etkisi incelenmemiştir.

Proje kapsamında, biyogaz üretim sistemi için çalıştırılması planlanan biyogaz motoru 350 kWe'lik bir motordur. Bu motorun özellikleri olarak yetkili satıcılardan toplanmış bilgiler kullanılmıştır. İlgili motor biyogazın yakılması için gerekli modifikasyonları yapılmış bir motordur ve bu motora ısı kazanım ünitesi eklenmiş haldedir. Motorun 1500 devrinde, elektrik verimi %38.6, ısıl verimi ise %47 dir. Modellemede bu bilgiler kullanılmıştır. Yanma için gerekli hava dış ortamdan alınmaktadır. Yanma sonucunda oluşan gazlar dış ortama (egzoz havuzu) atılmaktadır. Motora bağlı olan jeneratör ile elektrik üretilmektedir. Fermentörlerde belirli bir sıcaklık kontrolünün sağlanmasında motorun soğutulmasında kullanılan soğutma suyunun bir ısı değiştiriciden geçirilerek elde edilen ısının yaklaşık %20 si kullanılarak sağlanmaktadır. Geri kalan kısmı ise tesis içi bina ısıtılmasında (ısı havuzu) kullanılmaktadır.

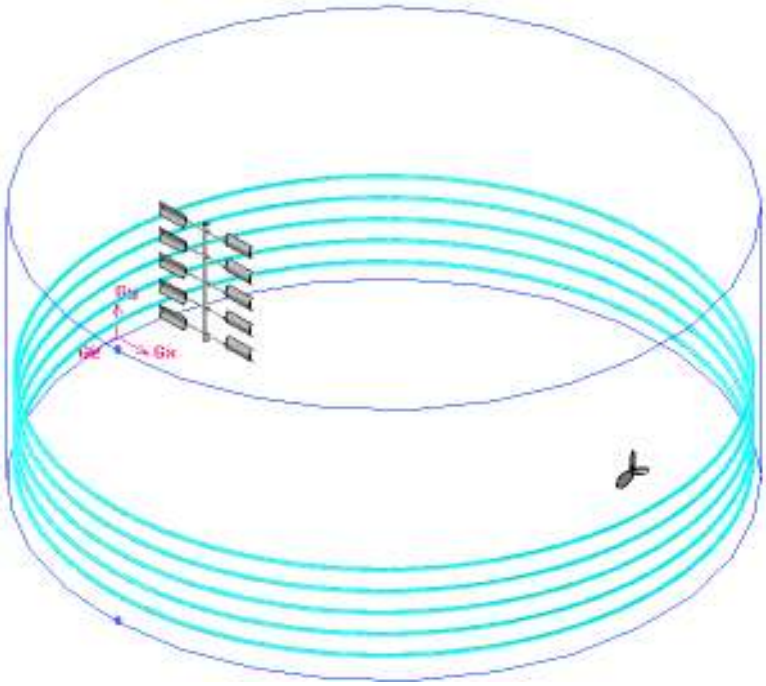
3.4.3. Biyogaz Fermantörünün Geometrisi

Biyogaz fermentörünün boyutları; çapı 13.3 m ve yüksekliği 6.34 m'dir. Isıtıcı sistem için fermentörün tabanından 0.5 m yükseklikten itibaren 0.5 m aralıklarla toplam beş sarmal olacak şekilde boru dış çapı 5 cm olan ve 3 cm dilim kalınlığında bakırdan yapılmış ısı dönüştürücü tasarlanmıştır. Fermentör içerisinde biri düşey biride yatay düzlemde iki adet karıştırıcı ile homojenizasyon sağlanmaktadır. Bunlardan büyük olanı 20 dev./d. ile diğeri ise maksimum 400 dev./d. da karıştırma işlemini gerçekleştirebilmektedir. Şekil 4.2 ve 4.3'te fermentör ve içerisinde kullanılan diğer sistemlerin farklı yönlerden görünümleri ile fermentör içerisindeki konumları verilmiştir. Karıştırıcılardan büyük olanı palet tipi karıştırıcıdır. Her bir karıştırıcı paletinin

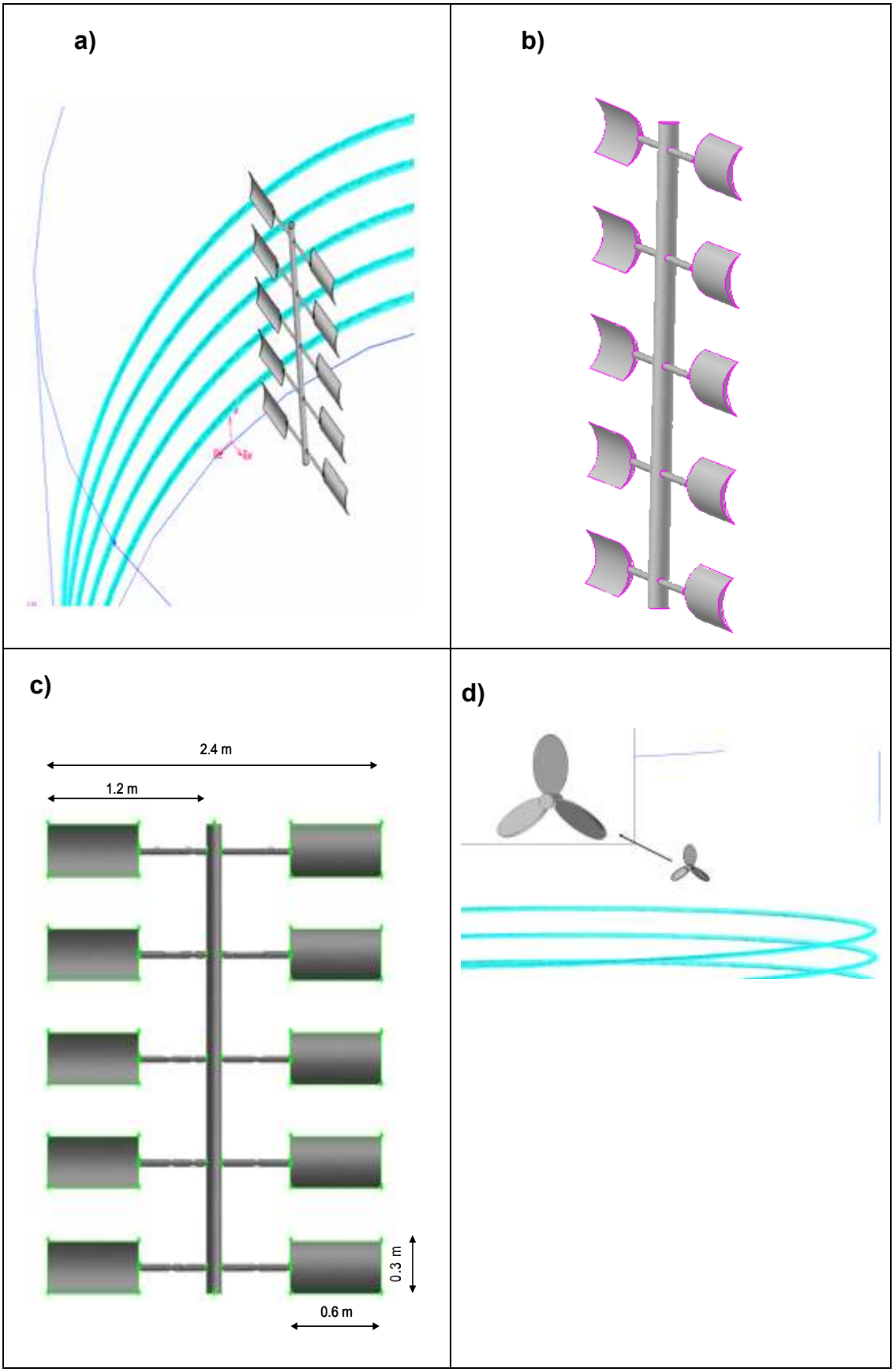
genişliği 60 cm, yüksekliği 30 cm., toplam kanat genişliği ise 2.4 m.dir. Diğer bir karıştırıcı olan mikser tipi karıştırıcıdır ve devir hızı oldukça yüksek değerlere (400 - 450 d/d) çıkabilmektedir. Ayrıca, bu karıştırıcı fermentör duvarında yukarı-aşağı hareket edebilecek şekilde monte edilmiştir. Karıştırıcılara ait çizimler Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Fermantör içi görünümü



Şekil 3.4 Karıştırıcıların fermantör içerisindeki yerleşimleri



Şekil 3.5 Karıştırıcıların detay çizimleri

4. BİYOGAZ SİSTEMİ ADM-1 MODELLEMESİ

Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) modeli oksijensiz çürütme proseslerine ait matematik modellerin geliştirilmesi için kurulmuş olan IWA çalışma grubu tarafından geliştirilmiştir. IWA çalışma grubunun temelleri ilk olarak uzun yıllar süren gelişim aşamalarının ardından 1997 yılında Japonya'nın Sendai kentinde düzenlenen 8. IAWQ Anerobic Digestion Konferansında atılmıştır. Grup, Konferans sonrası geçen 2 yıl boyunca grup üyelerinin araştırma tabanını oluşturma çalışmalarının ardından 1998'de IAWQ tarafından desteklenerek faaliyetlerine başlamıştır. 3 yıl süren çeşitli çalışmaların ardından tamamlanan ADM1 modeli 2001 yılında Belçikada düzenlenen 9. IAWQ Anerobic Digestion Konferansında sunulmuştur.

ADM1 modeli oksijensiz çürüme safhaları olan hidroliz, asidogenezis, asetogenezis ve metanogenezis safhalarının parçalar halinde incelenmesiyle oluşturulmuştur. Parçalara ayrılma mantığında model kompleks bileşiklerin çürümesini parçalanmış karakteristiklere indirgeyerek tarif eder. Tüm hidroliz prosesleri birinci derece kinetik denklemlerle betimlenmiştir. Tüm hücre içi biyokimyasal reaksiyonlar sübstrat bazlı Monod tipi kinetikler kullanılarak tanımlanmıştır. Biyokütlenin ölümü birinci derece kinetiklerle temsil edilmiştir. İnhibasyon fonksiyonları kurulurken pH (tüm gruplar), hidrojen (asetogenik gruplar) ve serbest amonyak (acetilastik metanogenezler) etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Fiziko kimyasal proseslerin tanımları asit-baz reaksiyonlarıyla yapılmıştır ve sıvı-gaz transfer eşitliği içermemektedir. Asit-baz eşitlikleri cebirsel eşitlik setleriyle veya bazı ek kinetik hız eşitlikleriyle tarif edilmiştir. Tüm modelde toplam olarak diferansiyel ve cebirsel eşitlik seti olarak(DAE), 26 adet dinamik durum değişkeni ve 19 adet biyokimyasal kinetik proses vardır. Bunlara ek olarak, 3 adet (gaz-sıvı transferi) kinetik hız eşitliği ile her kinetik proses ve sıvı tank başına 8 adet ek dinamik ve cebirsel değişken bulunmaktadır. Diferansiyel eşitlik seti olarak (DE) 32 adet dinamik durum değişkeni ve bu eşitlik setlerine ek olarak sıvı tank başına 6 adet asit-baz kinetik proses denkliği bulunmaktadır [BATSTONE ve ark. 2002].

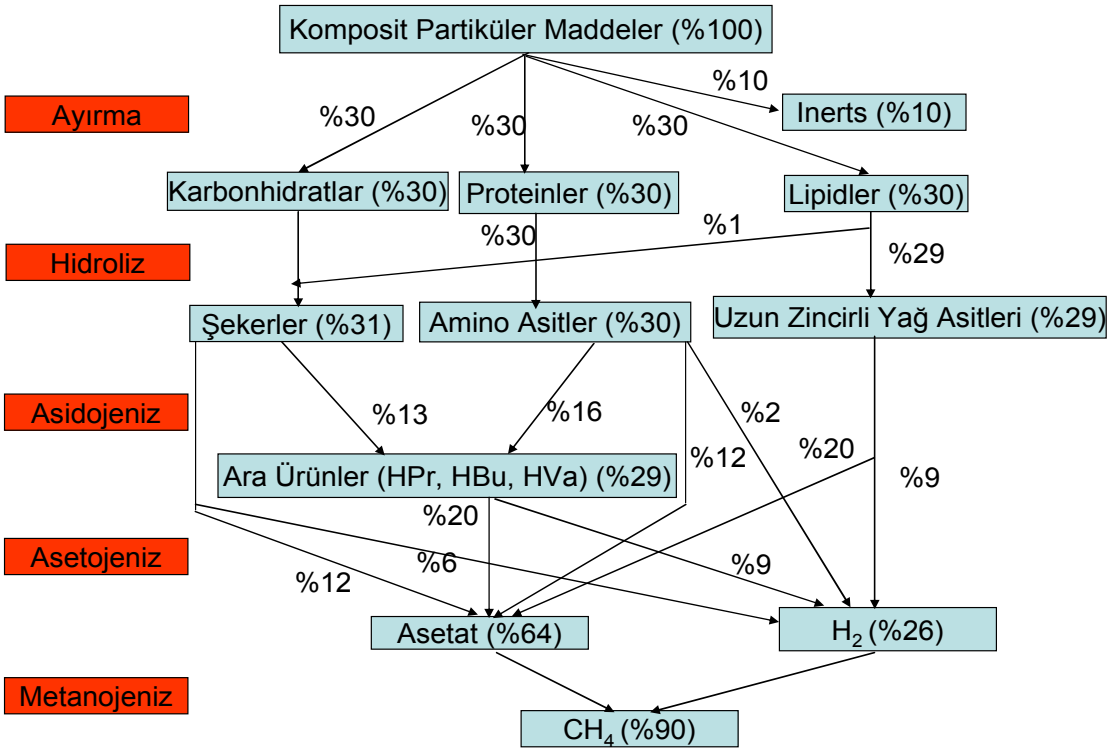
4.1. Modelde Kullanılan Dönüşüm Prosesleri

Oksijensiz çürümede dönüşüm prosesleri 2 ana tipe bölünebilir;

- **Biyokimyasal:** Bu prosesler normal olarak hücre içi ve dışında faaliyet gösteren enzimler tarafından katalizlenir ve mevcut organik madde havuzunda meydana gelirler. Ölmüş biyokütleler gibi bileşiklerin özel bileşenlere parçalanması ve onların sonraki çözünebilir monomerlere enzimatik hidrolizleri hücre dışı proseslerdir (extracellular). Organizmalar tarafından çözünmüş materyallerin çürütülmesi ise hücre içi prosesleridir.

- **Fiziko-kimyasal:** Bu prosesler biyolojik ortam prosesleri değildirler. İyon değişimleri ve sıvı-gaz faz transfer proseslerini içermektedir. Çökelme modelde ihmal edilmiştir.

Oksijensiz çürütme proseslerinde giren hammaddenin tamamı çürütülemeyeceğinden dolayı bu durum modelde tarif edilmelidir. Bu sebeple modelde, ayrıştırılabilir veya kullanılabilir materyal ile toplam kimyasal oksijen ihtiyacı arasındaki ayrım yapılmıştır. Modelde tanımlanan ayrıştırılabilirlik faktörü, D, reaktöre giren COD'nin en önemli karakteristiğidir. Genellikle, substrat terimi ayrıştırılabilir COD için kullanılırken, inert kısım (1-D) için çözülebilir (soluble) (S_I) ve partikül inert madde (particulate inert) (X_I) terimleri kullanılmaktadır. Modelde tanımlanan Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) akımı Şekil 4.1'de verilmektedir. Bu çalışmada, Kimyasal Oksijen İhtiyacı teriminin kısaltması için COD terimi kullanılacaktır.



Şekil 4.1 %10 İnertler, %30 Karbonhidrat, %30 Protein ve %30 Lipit içeren komposit partikül materyal için kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) akım şeması [BATSTONE ve ark. 2002].

Bölüm 3.4'te tanımlanan biyogaz üretim aşamaları modelde de kullanılmaktadır. Bu aşamalar arasındaki dönüşüm oranları Şekil 4.1'deki oranlar kabul edilerek modele yansıtılmıştır.

4.2. Model Parametreleri ve Model Değişkenleri

ADM1 modelinde 4 ana tip değişken tanımlanmaktadır. Bunlar; denge katsayıları, stokiyometrik katsayılar, kinetik parametreler, dinamik durum ve cebirsel değişkenlerdir. Bu değişkenler Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir [BATSTONE ve ark. 2002].

Tablo 4.1 Denge Katsayı ve Sabitleri

Sembol	**Tanımı**	**Birim**
H_{gas}	Gaz sabiti	bar M^{-1} (bar m^3 $kmol^{-1}$)
$K_{a,asit}$	Asit baz denge katsayısı	M (kmol m^3)
K_H	Henry katsayısı	M bar^{-1}(kmol m^{-3} bar^{-1})
pKa	$-\log_{10}[K_a]$	
R	Gaz sabiti (8.314×10^{-2})	Bar M^{-1}(bar m^3 $kmol^{-1}$ K^{-1})
ΔG	Serbest enerji	J mol^{-1}

Tablo 4.2 Stokiyometrik Katsayılar

Sembol	Tanımı	Birim
C_i	Bileşen (component), i, nin karbon içeriği	kmol C kg COD^{-1}
N_i	Bileşen, i, nin azot içeriği	kmol N kg COD^{-1}
$\nu_{i,j}$	j prosesinde bileşen i nin oran katsayısı	Nominal olarak kg COD m^{-3}
$f_{ürün, substrat}$	Substrat üzerinde ürün verimi (sadece katabolizm)	kg COD kg COD^{-1}

Tablo 4.3 Kinetik parametreler ve oranlar

Sembol	Tanımı	Birim
$K_{A/Bi}$	Asit baz kinetik parametresi	M^{-1} $gün^{-1}$
k_{dec}	Birinci derecenden azalma (decay) oranı	$gün^{-1}$
$I_{engelleyici, proses}$	Engelleme fonksiyonu	-
K_{proses}	Birinci derecenden parametre (hidroliz için)	$gün^{-1}$
k_{La}	Gaz-sıvı transfer katsayısı	$gün^{-1}$
$K_{I, engelleyici, substrat}$	%50 engelleyici konsantrasyon	kg COD m^{-3}
$k_{m,proses}$	Monod maksimum spesifik alım oranı	kg COD_S kg COD_X^{-1} $gün^{-1}$
$K_{s,proses}$	Yarılama değeri	kg COD_S m^{-3} $gün^{-1}$
ρ_j	Proses j nin kinetik oranı	kg COD_S m^{-3}
$Y_{substrat}$	Substrat üzerinde biyokütlenin verimi	kg COD_X kg COD_S^{-1}
μ_{max}	Monod maksimum spesifik büyüme oranı	$gün^{-1}$

Tablo 4.4 Dinamik ve cebirsel değişkenler

Sembol	Tanımı	Birim
pH	-log10[H+]	-
$p_{gas,i}$	Gaz i nin basıncı	Bar
P_{gas}	Toplam gaz basıncı	Bar
S_i	Çözünebilen bileşen i	kg COD m^{-3}
$T_{res,x}$	Katıların uzatılmış (extended) kalma süresi	gün
T	Sıcaklık	K
V	Hacim	m^3
X_i	Partikül bileşen i	kg COD m^{-3}

ADM 1 modeli esas olarak atık su arıtma prosesleri için tasarlandığından ve atık su ile yapılan çalışmalarda genel olarak COD kullanıldığından dolayı modelde de COD (kg COD m^{-3}≡ g COD l^{-1}) birim olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak inorganik bileşenler için ise birim "Molar" " (kmol m^{-3}) kullanılmaktadır.

4.2.1. Dinamik Durum Değişkenleri

Modelde dinamik durum değişkenleri ADM1 proses oranları, modellenen proses düzenlemesi, giriş ve başlangıç koşulları ile tanımlanan diferansiyel denklemlerin çözümüyle belirli bir zamanda (t) hesaplanan değerler olarak tanımlanmaktadır. Dinamik durum değişkenlerinin karakteristikleri Tablo 4.5'te verilmiştir [BATSTONE ve ark. 2002].

Tablo 4.5 Dinamik durum değişkenlerinin karakteristikleri

İsim	**Tanımı**	**Birim***	**Moleküler ağırlığı**	**g COD mol^{-1}**	**Karbon içeriği**	**Azot içeriği**
X_c	Komposit		Değişir	Değişir	Değişir	Değişir
X_{ch}	Karbonhidrat		Değişir	Değişir	0.0313	0
X_{pr}	Proteinler		Değişir	Değişir	Değişir	Değişir
X_{li}	Lipitler		806	2320	0.0220	0
X_I	Partikül inertler		Değişir	Değişir	Değişir	Değişir
S_I	Çözünebilir inertler		Değişir	Değişir	Değişir	Değişir
S_{su}	Monosakkaridler		180	192	0.0313	0
S_{aa}	Amino asitler		Değişir	Değişir	Değişir	Değişir
S_{fa}	Toplam uzun zincirli yağ asitleri		256	736	0.0217	0
S_{va}	Toplam valerat		102	208	0.0240	0
S_{bu}	Toplam Bütirat		88	160	0.0250	0
S_{pro}	Toplam propiyonat		74	112	0.0268	0
S_{ac}	Toplam asetat		60	64	0.0313	0
S_{h2}	Hidrojen		2	16	0	0
S_{CH4}	Metan		16	64	0.01156	0
S_{IC}	İnorganik karbon	M	44	0	1	0
S_{IN}	İnorganik azot	M	17	0	0	1
X_{su-H2}	Biyokütle		113	160	0.0313	0.00625
S_{cat}	Katyonlar		Değişir	0	0	0
S_{an}	İyonlar	M	Değişir	0	0	0

*Tersi belirtilmedikçe kg COD m^{-3}

4.2.2. Oran Denklem Matrisi

Modelde tanımlanan biyokimyasal reaksiyonlar için proses hızları ve stakiyometri matrisi Tablo 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.6 Çözünebilen bileşenler (i=1-12; j=1-19) biyokimyasal oran katsayıları ($v_{i,j}$) ve kinetik oran eşitlikleri (ρ_j)

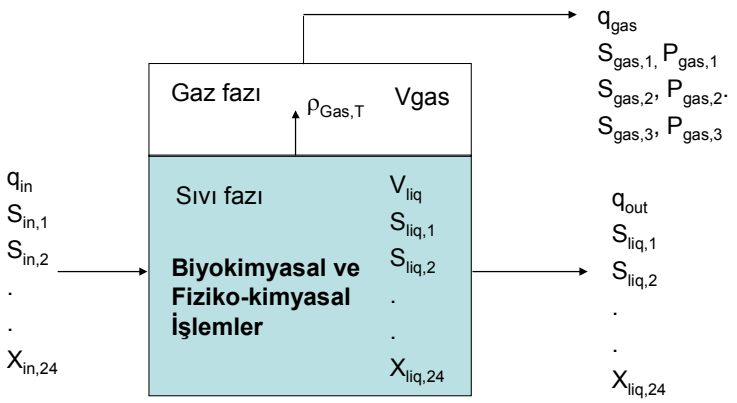
	Bileşenler→ i	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***	***Oran (ρi, kgCOD.m-3.gün-1)***
j	*Proses↓*	*Ssu*	*Saa*	*Sfa*	*Sva*	*Sbu*	*Spro*	*Sac*	*Sh2*	*Sch4*	*SIC*	*SIN*	*Sl*	
1	*Ayırma*												*fsl,xc*	*kdis Xc*
2	*Karbonhidrat hidrolizi*	*1*												*khyd,ch Xch*
3	*Protein hidrolizi*		*1*											*khyd,pr Xpr*
4	*Lipit hidrolizi*	*1-ffa,li*		*1-ffa,li*										*khyd,li Xli*
5	*Basit şeker alımı*	*-1*				*(1-γsu)fbu,su*	*(1-γsu)fpro,su*	*(1-γsu)fac,su*	*(1-γsu)fh2,su*		$-\sum_{i=9,11-24} C_i v_{i,5}$	*-(γsu)Nbac*		$k_{m,su}\frac{S_{su}}{K_S+S}X_{su}I_1$
6	*Amino asit alımı*		*-1*		*(1-γaa)fva,aa*	*(1-γaa)fbu,aa*	*(1-γaa)fpro,aa*	*(1-γaa)fac,aa*	*(1-γaa)fh2,aa*		$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,6}$	*Naa-(γaa)Nbac*		$k_{m,aa}\frac{s_{aa}}{K_S+S_{aa}}X_{aa}I_1$
7	*Uzun zincirli yağ asidi alımı*			*-1*				*(1-γfa)0.7*	*(1-γfa)0.8*			*-(γfa)Nbac*		$k_{m,fa}\frac{s_{aa}}{K_S+S_{fa}}X_{fa}I_2$
8	*Valerat alımı*				*-1*		*(1-γc4)0.54*	*(1-γc4)0.81*	*(1-γc4)0.15*			*-(γc4)Nbac*		$k_{m,c4}\frac{s_{va}}{K_S+S_{va}}X_{c4}\frac{1}{1+S_{bu}/S_{va}}I$
9	*Bütirat alımı*					*-1*		*(1-γc4)0.8*	*(1-γc4)0.2*			*-(γc4)Nbac*		$k_{m,c4}\frac{s_{bu}}{K_S+S_{bu}}X_{c4}\frac{1}{1+S_{va}/S_{bu}}I$
10	*Propiyonat alımı*						*-1*	*(1-γpro)0.57*	*(1-γpro)0.43*		$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,10}$	*-(γpro)Nbac*		$k_{m,pro}\frac{s_{pro}}{K_S+S_{pro}}X_{pro}I_2$
11	*Asetat alımı*							*-1*		*(1-γac)*	$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,11}$	*-(γac)Nbac*		$k_{m,ac}\frac{s_{ac}}{K_S+S_{ac}}X_{ac}I_3$
12	*Hidrojen alımı*								*-1*	*(1-γh2)*	$-\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,12}$	*-(γh2)Nbac*		$k_{m,h2}\frac{s_{h2}}{K_S+S_{h2}}X_{h2}I_1$
13	*Xsu azalımı*													*kdec,Xsu Xsu*
14	*Xaa azalımı*													*kdec,Xaa Xaa*
15	*Xfa azalımı*													*kdec,Xfa Xfa*
16	*Xc4 azalımı*													*kdec,Xc4 Xc4*
17	*Xpro azalımı*													*kdec,Xpro Xpro*
18	*Xac azalımı*													*kdec,Xac Xac*
19	*Xh2 azalımı*													*kdec,Xh2 Xh2*
		Monosakkaridler (kg COD m-3)	*Amino asitler (kg COD m-3)*	*Uzun zincirli yağ asidi (kg COD m-3)*	*Toplam valerat (kg COD m-3)*	*Toplam Bütirat (kg COD m-3)*	*Toplam Propiyonat (kg COD m-3)*	*Toplam astat (kg COD m-3)*	*Hidrojen gazı (kg COD m-3)*	*Metan gazı (kg COD m-3)*	*İnorganik karbon (kg COD m-3)*	*İnorganik azot (kg COD m-3)*	*Çözünebilir inert (kg COD m-3)*	*Engelleme faktörleri* *f1=IpH IIN,lim* *f2=IpH IIN,lim Ih2* *f3=IpH IIN,lim INH3,Xac*

Tablo 4.7 Partikül bileşenler (i=13-24; j=1-19) biyokimyasal oran katsayıları (vi,j) ve kinetik oran eşitlikleri (ρj)

	Bileşenler→ i	***13***	***14***	***15***	***16***	***17***	***18***	***19***	***20***	***21***	***22***	***23***	***24***	***Oran (ρi, kgCOD.m-3.gün-1)***
j	*Prosesler↓*	*Xc*	*Xch*	*Xpr*	*Xli*	*Xsu*	*Xaa*	*Xfa*	*Xc4*	*Xpro*	*Xac*	*Xh2*	*Xl*	
1	*Ayırma*	*-1*	*fch, xc*	*fpr,xc*	*fli,xc*								*fxl,xc*	*kdis Xc*
2	*Karbonhidrat hidrolizi*		*-1*											*khyd,ch Xch*
3	*Protein hidrolizi*			*-1*										*khyd,pr Xpr*
4	*Lipit hidrolizi*				*-1*									*khyd,li Xli*
5	*Basit şeker alımı*					*γsu*								$k_{m,su}\frac{S_{su}}{K_S+S}X_{su}I_1$
6	*Amino asit alımı*						*γaa*							$k_{m,aa}\frac{s_{aa}}{K_S+S_{aa}}X_{aa}I_1$
7	*Uzun zincirli yağ asidi alımı*							*γfa*						$k_{m,fa}\frac{s_{aa}}{K_S+S_{fa}}X_{fa}I_2$
8	*Valerat alımı*								*γc4*					$k_{m,c4}\frac{s_{va}}{K_S+S_{va}}X_{c4}\frac{1}{1+S_{bu}/S_{va}}I$
9	*Bütirat alımı*								*γc4*					$k_{m,c4}\frac{s_{bu}}{K_S+S_{bu}}X_{c4}\frac{1}{1+S_{va}/S_{bu}}I$
10	*Propiyonat alımı*									*γpro*				$k_{m,pro}\frac{s_{pro}}{K_S+S_{pro}}X_{pro}I_2$
11	*Asetat alımı*										*γac*			$k_{m,ac}\frac{s_{ac}}{K_S+S_{ac}}X_{ac}I_3$
12	*Hidrojen alımı*											*γh2*		$k_{m,h2}\frac{s_{h2}}{K_S+S_{h2}}X_{h2}I_1$
13	*Xsu azalımı*	*1*				*-1*								*kdec,Xsu Xsu*
14	*Xaa azalımı*	*1*					*-1*							*kdec,Xaa Xaa*
15	*Xfa azalımı*	*1*						*-1*						*kdec,Xfa Xfa*
16	*Xc4 azalımı*	*1*							*-1*					*kdec,Xc4 Xc4*
17	*Xpro azalımı*	*1*								*-1*				*kdec,Xpro Xpro*
18	*Xac azalımı*	*1*									*-1*			*kdec,Xac Xac*
19	*Xh2 azalımı*	*1*										*-1*		*kdec,Xh2 Xh2*
		Kompozitler (kg COD m-3)	*Karbonhidratlar (kg COD m-3)*	*Proteinler (kg COD m-3)*	*Lipitler (kg COD m-3)*	*Şeker parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Amino asit parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Uzun zincirli yağ asidi parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Valerat ve bütirat parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Propiyonat parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Asetat parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Hidrojen parçalayıcıları (kg COD m-3)*	*Partikül inert lerin (kg COD m-3)*	*Engelleme faktörleri f1=IpH IIN,lim f2=IpH IIN,lim Ih2 f3=IpH IIN,lim INH3,Xac*

4.3. CSTR Modellemesi

Genel biyogaz modellemesinde ilk olarak sistem tek kademeli sürekli beslemeli tank reaktör olarak düşünülecek ve sonrasında oluşturulan model genel tesis akışına uygun olarak adapte edilecektir. Bu amaçla yapılan CSTR şekli aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.2 CSTR model gösterimi

(q= akış debisi (m^3gün^{-1}), V= hacim (m^3), $S_{akış,i}$= çözülebilir bileşenin konsantrasyonu (kg COD m^{-3}), $X_{akış,i}$= partikül bileşenin konsantrasyonu (kg COD m^{-3}).

Modelin bu kısmında reaktör sabit hacimli olarak düşünülerek oksijensiz çürütme işlemi için gerekli biyokimyasal ve fizikokimyasal prosesleri açıklayan denklikler kurulmuştur. ADM1 modelinde biyokimyasal ve fizikokimyasal prosesler sıvı ve gaz fazda meydana geldiği kabul edilmektedir.

4.3.1. Genel Sıvı Faz Denklikleri

Sıvı fazda her bir bileşen için kütle denkliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{dVS_{liq,i}}{dt} = q_{in}S_{in,i} - q_{out}S_{liq,i}\sum_{j=1-19}\rho_j\nu_{i,j} \qquad (1)$$

Burada;

$\sum_{j=1-19} \rho_j \nu_{i,j}$ =j prosesi için özgül kinetik oranlarının (ρ_j), $v_{i,j}$ ile çarpımlarının toplamıdır (Tablo 4.6 ve 4.7).

S_{in}= Fermentöre giren çözünebilir bileşen konsantrasyonu (kg COD m^{-3})

S_{liq}= Fermentörden çıkan akışın konsantrasyonu (kg COD m^{-3})

V_{liq}= Sıvının kapladığı hacim (m^3)

T= zaman (gün)

q_{in}, q_{out}= Fermentöre giren ve çıkan akışın volumetrik debileri (m^3gün^{-1})

Hacmi sabit kabul ettiğimizden dolayı giriş ve çıkış yoğunlukları değişmeyecek ve (1) nolu eşitlik şu şekilde düzenlenebilecektir;

$$\frac{dS_{liq,i}}{dt} = \frac{q\,S_{in,i}}{V_{liq}} - \frac{q\,S_{liq,i}}{V_{liq}} + \sum_{j=1-19} \rho_j \nu_{i,j} \qquad (2)$$

Hız eşitliklerine ek olarak sıvı/gaz transfer kinetik hız eşitlikleri de eklenmelidir;

$$\rho_{T,H2} = k_{La}\left(S_{Liq,H2} - 16K_{H,H2}\,p_{gas,H2}\right) \qquad (3.1)$$

$$\rho_{T,CH4} = k_{La}\left(S_{Liq,CH4} - 16K_{H,CH4}\,p_{gas,CH4}\right) \qquad (3.2)$$

$$\rho_{T,IC} = k_{La}\left(S_{Liq,CO2} - 16K_{H,CO2}\,p_{gas,CO2}\right) \qquad (3.3)$$

$\rho_{T,i}$:i gazının transfer hızı, ve $S_{liq,CO2}$:İnorganik karbonun CO_2'deki fraksiyonudur.

4.3.2. Genel Gaz Fazı Denklikleri

Gaz fazında da sıvı fazdaki gibi kütle denkliği kurulduğunda sıvı faz denkliğinden farklı olarak sadece dinamik durum değişkenlerinin yer aldığı ve advektif terimin olmadığı bir denklem ortaya çıkar. Bu dinamik durum değişkenleri basınç veya konsantrasyon olabilir.

$$\frac{dS_{gas,i}}{dt} = \frac{S_{gas,i}\ q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,i}\frac{V_{liq}}{V_{gas}} \tag{4}$$

Her bir gaz bileşeninin basıncı (biyogaz sistemleri için kayda değer oranda olan 3 gaz için) ideal gaz yasası kullanılarak hesaplanabilir;

$$p_{gas,H2} = S_{gas,H2}RT/16 \tag{5}$$

$$p_{gas,CH4} = S_{gas,CH4}RT/64 \tag{6}$$

$$p_{gas,CO2} = S_{gas,CO2}RT \tag{7}$$

$$p_{gas,H2O} = 0{,}0313\exp\left(5290\left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T}\right)\right) \tag{8}$$

$$q_{gas} = \frac{RT}{P_{gas} - p_{gas,H2O}}V_{liq}\left(\frac{\rho_{T,H2}}{16} + \frac{\rho_{T,CH4}}{64} + \rho_{T,CO2}\right) \tag{9}$$

$$P_{gas} = p_{gas,H2} + p_{gas,CH4} + p_{gas,CO2} + p_{gas,H2O} \tag{10}$$

$$q_{gas} = k_p\left(P_{gas} - P_{atm}\right) \tag{11}$$

11 denkliğinde k_p, boru direnç sabiti ($m^3d^{-1}bar^{-1}$)'dir.

4.4. Model Eşitlikleri

4.4.1. Proses Oran Denklemleri

Tablo 4.6'nın son sütununda verilmiş olan biyokimyasal prosesler için proses oran denklemleri model eşitliklerinin kurulmasında kullanılmıştır.

$$\rho_1 = k_{dis} \cdot X_c \tag{12.1}$$

$$\rho_2 = k_{hyd,ch} \cdot X_{ch} \tag{12.2}$$

$$\rho_3 = k_{hyd,pr} \cdot X_{pr} \tag{12.3}$$

$$\rho_4 = k_{hyd,li} \cdot X_{li} \tag{12.4}$$

$$\rho_5 = k_{m,su} \cdot \frac{S_{su}}{K_{S,su} + S_{su}} \cdot X_{su} \cdot I_5 \tag{12.5}$$

$$\rho_6 = k_{m,aa} \cdot \frac{S_{aa}}{K_{S,aa} + S_{aa}} \cdot X_{aa} \cdot I_6 \tag{12.6}$$

$$\rho_7 = k_{m,fa} \cdot \frac{S_{fa}}{K_{S,fa} + S_{fa}} \cdot X_{fa} \cdot I_7 \tag{12.7}$$

$$\rho_8 = k_{m,c4} \cdot \frac{S_{va}}{K_{S,c4} + S_{va}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{S_{va}}{S_{bu} + S_{va} + 1e-6} \cdot I_8 \tag{12.8}$$

$$\rho_9 = k_{m,c4} \cdot \frac{S_{bu}}{K_{S,c4} + S_{bu}} \cdot X_{c4} \cdot \frac{S_{bu}}{S_{va} + S_{bu} + 1e-6} \cdot I_9 \tag{12.9}$$

$$\rho_{10} = k_{m,pr} \cdot \frac{S_{pro}}{K_{S,pro} + S_{pro}} \cdot X_{pro} \cdot I_{10} \tag{12.10}$$

$$\rho_{11} = k_{m,ac} \cdot \frac{S_{ac}}{K_{S,ac} + S_{ac}} \cdot X_{ac} \cdot I_{11} \tag{12.11}$$

$$\rho_{12} = k_{m,h2} \cdot \frac{S_{h2}}{K_{S,h2} + S_{h2}} \cdot X_{h2} \cdot I_{12} \tag{12.12}$$

$$\rho_{13} = k_{dec,Xsu} \cdot X_{su} \tag{12.13}$$

$$\rho_{14} = k_{dec,Xaa} \cdot X_{aa} \tag{12.14}$$

$$\rho_{15} = k_{dec,Xfa} \cdot X_{fa} \tag{12.15}$$

$$\rho_{16} = k_{dec,Xc4} \cdot X_{c4} \tag{12.16}$$

$$\rho_{17} = k_{dec,Xpro} \cdot X_{pro} \tag{12.17}$$

$$\rho_{18} = k_{dec,Xac} \cdot X_{ac} \tag{12.18}$$

$$\rho_{19} = k_{dec,Xh2} \cdot X_{h2} \tag{12.19}$$

Asit-baz oranları

$$\rho_{A,4} = k_{A,Bva}(S_{va} - (K_{a,va} + S_{H^+}) - K_{a,va}S_{va}) \tag{13.1}$$

$$\rho_{A,5} = k_{A,Bbu}(S_{bu} - (K_{a,bu} + S_{H^+}) - K_{a,bu}S_{bu}) \tag{13.2}$$

$$\rho_{A,6} = k_{A,Bpro}(S_{pro} - (K_{a,pro} + S_{H^+}) - K_{a,pro}S_{pro}) \tag{13.3}$$

$$\rho_{A,7} = k_{A,Bac}(S_{ac} - (K_{a,ac} + S_{H^+}) - K_{a,ac}S_{ac}) \tag{13.4}$$

$$\rho_{A,10} = k_{A,Bco2}(S_{hco3} - (K_{a,co2} + S_{H^+}) - K_{a,co2}S_{IC}) \quad (13.5)$$

$$\rho_{A,11} = k_{A,BIN}(S_{nh3} - (K_{a,IN} + S_{H^+}) - K_{a,IN}S_{IN}) \quad (13.6)$$

4.4.2. Prosesin Engellenmesi

Engelleme:

$$I_{5,6} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \quad (14.1)$$

$$I_7 = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2.fa} \quad (14.2)$$

$$I_{8,9} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2.c4} \quad (14.3)$$

$$I_{10} = I_{pH,aa} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{h2.pro} \quad (14.4)$$

$$I_{11} = I_{pH,ac} \cdot I_{IN,lim} \cdot I_{nh3} \quad (14.5)$$

$$I_{12} = I_{pH,h2} \cdot I_{IN,lim} \quad (14.6)$$

$$I_{pH,aa} = \begin{cases} exp(-3(\frac{pH - pH_{UL,aa}}{pH_{UL,aa} - pH_{LL,aa}})^2) & : pH < pH_{UL,aa} \\ 1 & : pH > pH_{UL,aa} \end{cases} \quad (14.7)$$

$$I_{pH,ac} = \begin{cases} exp(-3(\frac{pH - pH_{UL,ac}}{pH_{UL,ac} - pH_{LL,ac}})^2) & : pH < pH_{UL,ac} \\ 1 & : pH > pH_{UL,ac} \end{cases} \quad (14.8)$$

$$I_{pH,h2} = \begin{cases} exp(-3(\frac{pH - pH_{UL,h2}}{pH_{UL,h2} - pH_{LL,h2}})^2) & : pH < pH_{UL,h2} \\ 1 & : pH > pH_{UL,h2} \end{cases} \quad (14.9)$$

$$I_{IN,lim} = \frac{1}{1 + K_{S,IN}/S_{IN}} \quad (14.10)$$

$$I_{h2,fa} = \frac{1}{1 + S_{h2}/K_{I,h2,fa}} \quad (14.11)$$

$$I_{h2,c4} = \frac{1}{1 + S_{h2}/K_{I,h2,c4}} \quad (14.12)$$

$$I_{h2,pro} = \frac{1}{1 + S_{h2} / K_{I,h2,pro}} \tag{14.13}$$

$$I_{nh3} = \frac{1}{1 + S_{nh3} / K_{I,nh3}} \tag{14.14}$$

$$pH = -log_{10}(S_{H^+}) \tag{14.15}$$

4.4.3. Sıvı Fazı Eşitlikleri

Çözülebilir madde için;

$$\frac{dS_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{su,in} - S_{su}\right) + \rho_2 + \left(1 - f_{fa,li}\right)\rho_4 - \rho_5 \tag{15}$$

$$\frac{dS_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{aa,in} - S_{aa}\right) + \rho_3 - \rho_6 \tag{16}$$

$$\frac{dS_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{fa,in} - S_{fa}\right) + f_{fa,li}\rho_4 - \rho_7 \tag{17}$$

$$\frac{dS_{va}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{va,in} - S_{va}\right) + \left(1 - Y_{aa}\right)f_{va,aa}\rho_6 - \rho_8 \tag{18}$$

$$\frac{dS_{bu}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{bu,in} - S_{bu}\right) + \left(1 - Y_{su}\right)f_{bu,su}\rho_5 + \left(1 - Y_{aa}\right)f_{bu,aa}\rho_6 - \rho_9 \tag{19}$$

$$\frac{dS_{pro}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{pro,in} - S_{pro}\right) + \left(1 - Y_{su}\right)f_{pro,su}\rho_5 + \left(1 - Y_{aa}\right)f_{pro,aa}\rho_6 + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}54\rho_8 - \rho_{10} \tag{20}$$

$$\frac{dS_{ac}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{ac,in} - S_{ac}\right) + \left(1 - Y_{su}\right)f_{ac,su}\rho_5 + \left(1 - Y_{aa}\right)f_{ac,aa}\rho_6 + \left(1 - Y_{fa}\right)0{,}7\rho_7 + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}31\rho_8 + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}8\rho_9 + \left(1 - Y_{pro}\right)0{,}57\rho_{10} - \rho_{11} \tag{21}$$

$$\frac{dS_{h2}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{h2,in} - S_{h2}\right) + \left(1 - Y_{su}\right)f_{h2,su}\rho_5 + \left(1 - Y_{aa}\right)f_{h2,aa}\rho_6 + \left(1 - Y_{fa}\right)0{,}3\rho_7 + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}15\rho_8 + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}2\rho_9 + \left(1 - Y_{pro}\right)0{,}43\rho_{10} - \rho_{12} - \rho_{T,8} \tag{22}$$

$$\frac{dS_{ch4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{ch4,in} - S_{ch4}\right) + \left(1 - Y_{ac}\right)\rho_{11} + \left(1 - Y_{h2}\right)\rho_{12} - \rho_{T,9} \tag{23}$$

$$\frac{dS_{IC}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{IC,in} - S_{IC}\right) + \sum_{j=1}^{19}\left(\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,j}\rho_j\right) - \rho_{T,10} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}\frac{dS_{IN}}{dt} = {} & \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{IN,in} - S_{IN}\right) - Y_{su}N_{bac}\rho_5 + \left(N_{aa} - Y_{aa}N_{bac}\right)\rho_6 - Y_{fa}N_{bac}\rho_7 - Y_{c4}N_{bac}\rho_8 - Y_{c4}N_{bac}\rho_9 - \\ & Y_{pro}N_{bac}\rho_{10} - Y_{ac}N_{bac}\rho_{11} - Y_{h2}N_{bac}\rho_{12} + \left(N_{bac} - N_{xc}\right)\sum_{i=13}^{19}\rho_i + \left(N_{xc} - f_{xI,xc}N_I - f_{sI,xc}N_I - f_{pr,xc}N_{aa}\right)\rho_1\end{aligned} \tag{25}$$

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{I,in} - S_I\right) + f_{sI,xc}\rho_1 \tag{26}$$

Daha spesifik olarak denklem 24 deki toplam aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\sum_{j=1}^{19}\left(\sum_{i=1-9,11-24} C_i v_{i,j}\rho_j\right) = \sum_{k=1}^{12} s_k\rho_k + s_{13}\left(\rho_{13} + \rho_{14} + \rho_{15} + \rho_{16} + \rho_{17} + \rho_{18} + \rho_{19}\right) \tag{27}$$

Burada;

$$s_1 = -C_{xc} + f_{sI,xc}C_{sI} + f_{ch,xc}C_{ch} + f_{pr,xc}C_{pr} + f_{li,xc}C_{li} + f_{xI,xc}C_{xI} \tag{28}$$

$$s_2 = -C_{ch} + C_{su} \tag{29}$$

$$s_3 = -C_{pr} + C_{aa} \tag{30}$$

$$s_4 = -C_{li} + \left(1 - f_{fa,li}\right)C_{su} + f_{fa,li}C_{fa} \tag{31}$$

$$s_5 = -C_{su} + \left(1 - Y_{su}\right)\left(f_{bu,su}C_{bu} + f_{pro,su}C_{pro} + f_{ac,su}C_{ac}\right) + Y_{su}C_{bac} \tag{32}$$

$$s_6 = -C_{aa} + \left(1 - Y_{aa}\right)\left(f_{va,aa}C_{va} + f_{bu,aa}C_{bu} + f_{pro,aa}C_{pro} + f_{ac,aa}C_{ac}\right) + Y_{aa}C_{bac} \tag{33}$$

$$s_7 = -C_{fa} + \left(1 - Y_{fa}\right)0{,}7C_{ac} + Y_{fa}C_{bac} \tag{34}$$

$$s_8 = -C_{va} + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}54C_{pro} + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}31C_{ac} + Y_{c4}C_{bac} \tag{35}$$

$$s_9 = -C_{bu} + \left(1 - Y_{c4}\right)0{,}8C_{ac} + Y_{c4}C_{bac} \tag{36}$$

$$s_{10} = -C_{pro} + (1 - Y_{pro})0{,}57C_{ac} + Y_{pro}C_{bac} \tag{37}$$

$$s_{11} = -C_{ac} + (1 - Y_{ac})C_{ch4} + Y_{ac}C_{bac} \tag{38}$$

$$s_{12} = (1 - Y_{h2})C_{ch4} + Y_{ac}C_{bac} \tag{39}$$

$$s_{13} = -C_{bac} + C_{cx} \tag{40}$$

Partikül madde için;

$$\frac{dX_c}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{c,in} - X_c\right) - \rho_1 + \sum_{i=13}^{19}\rho_i \tag{41}$$

$$\frac{dX_{ch}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{ch,in} - X_{ch}\right) + f_{ch,xc}\rho_1 - \rho_2 \tag{42}$$

$$\frac{dX_{pr}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{pr,in} - X_{pr}\right) + f_{pr,xc}\rho_1 - \rho_3 \tag{43}$$

$$\frac{dX_{li}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{li,in} - X_{li}\right) + f_{li,xc}\rho_1 - \rho_4 \tag{44}$$

$$\frac{dX_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{su,in} - X_{su}\right) + Y_{su}\rho_5 - \rho_{13} \tag{45}$$

$$\frac{dX_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{aa,in} - X_{aa}\right) + Y_{aa}\rho_6 - \rho_{14} \tag{46}$$

$$\frac{dX_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{fa,in} - X_{fa}\right) + Y_{fa}\rho_7 - \rho_{15} \tag{47}$$

$$\frac{dX_{c4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{c4,in} - X_{c4}\right) + Y_{c4}\rho_8 + Y_{c4}\rho_9 - \rho_{16} \tag{48}$$

$$\frac{dX_{pro}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{pro,in} - X_{pro}\right) + Y_{pro}\rho_{10} - \rho_{17} \tag{49}$$

$$\frac{dX_{ac}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{ac,in} - X_{ac}\right) + Y_{ac}\rho_{11} - \rho_{18} \tag{50}$$

$$\frac{dX_{h2}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{h2,in} - X_{h2}\right) + Y_{h2}\rho_{12} - \rho_{19} \tag{51}$$

$$\frac{dX_{I}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(X_{I,in} - X_{I}\right) + f_{xI,xc}\rho_{1} \tag{52}$$

Anyon ve katyon:

$$\frac{dS_{cat^+}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{cat^+,in} - S_{cat^+}\right) \tag{53}$$

$$\frac{dS_{an^-}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}\left(S_{an^-,in} - S_{an^-}\right) \tag{54}$$

İyonlar için:

$$\frac{dS_{va^-}}{dt} = -\rho_{A,4} \tag{55}$$

$$\frac{dS_{bu^-}}{dt} = -\rho_{A,5} \tag{56}$$

$$\frac{dS_{pro^-}}{dt} = -\rho_{A,6} \tag{57}$$

$$\frac{dS_{ac^-}}{dt} = -\rho_{A,7} \tag{58}$$

$$\frac{dS_{hco3^-}}{dt} = -\rho_{A,10} \tag{59}$$

$$\frac{dS_{nh3}}{dt} = -\rho_{A,11} \tag{60}$$

Cebirsel denklemler:

$$S_{H^+} = \frac{\Theta}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\Theta^2 + 4K_W} \tag{60}$$

$$\Theta = S_{cat^+} + S_{nh4^+} - S_{hco3^-} - \frac{S_{ac^-}}{64} - \frac{S_{pro^-}}{112} - \frac{S_{bu^-}}{160} - \frac{S_{va^-}}{208} - S_{an^-} \tag{61}$$

$$S_{nh4^+} = S_{IN} - S_{nh3} \tag{62}$$

$$S_{co2} = S_{IC} - S_{hco3^-} \tag{63}$$

4.4.4. Gaz Fazı Eşitlikleri

Diferansiyel eşitlikler

$$\frac{dS_{gas,h2}}{dt} = -\frac{S_{gas,h2} q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,8} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \tag{64}$$

$$\frac{dS_{gas,ch4}}{dt} = -\frac{S_{gas,ch4} q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,9} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \tag{65}$$

$$\frac{dS_{gas,co2}}{dt} = -\frac{S_{gas,co2} q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,10} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \tag{66}$$

4.4.5. Cebirsel Eşitlikler

$$p_{gas,h2} = S_{gas,h2} \cdot \frac{RT_{op}}{16} \tag{67}$$

$$p_{gas,ch4} = S_{gas,ch4} \cdot \frac{RT_{op}}{64} \tag{68}$$

$$p_{gas,co2} = S_{gas,co2} \cdot RT_{op} \tag{69}$$

$$q_{gas} = \frac{RT_{op}}{P_{atm} - p_{gas,H_2O}} \cdot V_{liq} \left(\frac{\rho_{T,8}}{16} + \frac{\rho_{T,9}}{64} + \rho_{T,10} \right) \tag{70}$$

Bu şekilde kurulan eşitliklerde denklemlerin çözülmesinde problemler meydana gelebilmektedir. Bu sebeple Batstone ve ark.'nın önerdiği gaz debisi hesabı daha uygun olabilmektedir [BATSTONE ve ark, 2002].

$$q_{gas} = k_p\left(P_{gas} - P_{atm}\right) \tag{71}$$

$$P_{gas} = p_{gas,h2} + p_{gas,ch4} + p_{gas,co2} + p_{gas,h20} \tag{72}$$

Bu hesaplamada çürütücü üstündeki boşlukta fazla miktarda basınç olduğunu kabul edilmektedir. Bunu dikkate alan ifade ile atmosfer basıncındaki debi hesaplanabilir;

$$q_{gas} = k_p\left(P_{gas} - P_{atm}\right)\cdot\frac{P_{gas}}{P_{atm}} \tag{73}$$

4.5. ADM1 Modeli Parametre Değerleri

ADM1 modeli için Rosen ve Jeppsson tarafından verilen stokiyometrik parametre değerleri Tablo 4.8'de sunulmaktadır. Tablo 4.9'da biyokimyasal parametre değerleri, Tablo 4.10'da fiziko-kimyasal parametre değerleri ve Tablo 4.11'de de fiziksel parametre değerleri verilmektedir [ROSEN ve JEPPSSON, 2006].

Tablo 4.8 Stokiyometrik parametre değerleri

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
$f_{sl,\,xc}$	0.1	–	1	
$f_{xl,\,xc}$	0.2	–	1	
$f_{ch,\,xc}$	0.2	–	1	
$f_{pr,\,xc}$	0.2	–	1	
$f_{li,\,xc}$	0.3	–	1	Not:1- $f_{ch,\,xc}$ - $f_{pr,\,xc}$- $f_{sl,\,xc}$- $f_{xl,\,xc}$- $f_{li,\,xc}$= 0
N_{xc}	0.0376/14	kmol N (kg COD)$^{-1}$	1, 13-19	Ayrıma prosesinde azot dengesini sağlamak için
N_I	0.06/14	kmol N (kg COD)$^{-1}$	1	6% ASM değerlendirme modelinde
N_{aa}	0.007	kmol N (kg COD)$^{-1}$	1,6	
C_{xc}	0.02786	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1,13-19	C_{13} denklem 10
C_{sl}	0.03	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1	C_{12} denklem 10
C_{ch}	0.0313	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1,2	C_{14} denklem 10
C_{pr}	0.03	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1,3	C_{15} denklem. 10
C_{li}	0.022	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1,4	C_{16} denklem 10
C_{xl}	0.03	kmol C (kg COD)$^{-1}$	1	C_{24} denklem 10

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
C_{su}	0.0313	kmol C (kg COD)$^{-1}$	2,5	C_1 denklem 10
C_{aa}	0.03	kmol C (kg COD)$^{-1}$	3,6	C_2 denklem 10
$f_{fa,li}$	0.95	–	4	
C_{fa}	0.0217	kmol C (kg COD)$^{-1}$	4,7	C_3 denklem 10
$f_{h2,su}$	0.19	–	5	
$f_{bu,su}$	0.13	–	5	
$f_{pro,su}$	0.27	–	5	
$f_{ac,su}$	0.41	–	5	
N_{bac}	0.08/14	kmol N (kg COD)$^{-1}$	5-19	8% ASM değerlendirme modelinde yaş baz
C_{bu}	0.025	kmol C (kg COD)$^{-1}$	5,6,9	C_5 denklem 10
C_{pro}	0.0268	kmol C (kg COD)$^{-1}$	5,6,8,10	C_6 denklem 10
C_{ac}	0.0313	kmol C (kg COD)$^{-1}$	5-11	C_7 denklem 10
C_{bac}	0.0313	kmol C (kg COD)$^{-1}$	5-19	C_{17-23} denklem 10
Y_{su}	0.1	–	5	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
$f_{h2,aa}$	0.06	–	6	
$f_{va,aa}$	0.23	–	6	
$f_{bu,aa}$	0.26	–	6	
$f_{pro,aa}$	0.05	–	6	
$f_{ac,aa}$	0.40	–	6	
C_{va}	0.024	kmol C (kg COD)$^{-1}$	6,8	C_4 denklem 10
Y_{aa}	0.08	–	6	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
Y_{fa}	0.06	–	7	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
Y_{c4}	0.06	–	8,9	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
Y_{pro}	0.04	–	10	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
C_{ch4}	0.0156	kmol C (kg COD)$^{-1}$	11,12	C_9 denklem 10
Y_{ac}	0.05	–	11	kg COD_X (kg COD_S)$^{-1}$
Y_{h2}	0.06	–	12	kg COD_S (kg COD_X)$^{-1}$

Tablo 4.9 Biyokimyasal parametre değerleri

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
k_{dis}	0.5	gün^{-1}	1	
$k_{hyd,ch}$	10	gün^{-1}	2	
$k_{hyd,pr}$	10	gün^{-1}	3	
$k_{hyd,li}$	10	gün^{-1}	4	
$K_{S,IN}$	1e-4	M	5-12	
$k_{m,su}$	30	gün^{-1}	5	
$K_{S,su}$	0.5	kg COD m^{-3}	5	
$pH_{UL,aa}$	5.5		5-10	I_{5-10} *için*
$pH_{LL,aa}$	4		5-10	I_{5-10} *için*

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
$k_{m,aa}$	50	gün $^{-1}$	6	
$K_{S,aa}$	0.3	kg COD m^{-3}	6	
$k_{m,fa}$	6	gün $^{-1}$	7	
$K_{S,fa}$	0.4	kg COD m^{-3}	7	
$K_{Ih2,fa}$	5e-6	kg COD m^{-3}	7	I_7 *için*
$k_{m,c4}$	20	gün $^{-1}$	8,9	
$K_{S,c4}$	0.2	kg COD m^{-3}	8,9	
$K_{Ih2,c4}$	1e-5	kg COD m^{-3}	8,9	I_8 ve I_9 *için*
$k_{m,pro}$	13	gün $^{-1}$	10	
$K_{S,pro}$	0.1	kg COD m^{-3}	10	
$K_{Ih2,pro}$	3.5e-6	kg COD m^{-3}	10	I_{10} *için*
$k_{m,ac}$	8	gün $^{-1}$	11	
$K_{S,ac}$	0.15	kg COD m^{-3}	11	
$K_{I,nh3}$	0.0018	M	11	I_{11} *için*
$pH_{UL,ac}$	7		11	I_{11} *için*
$pH_{LL,ac}$	6		11	I_{11} *için*
$k_{m,h2}$	35	gün^{-1}	12	
$K_{S,h2}$	7e-6	kg COD m^{-3}	12	
$pH_{UL,h2}$	6		12	I_{12} *için*
$pH_{LL,h2}$	5		12	I_{12} *için*
$k_{dec,}X_{su}$	0.2	gün $^{-1}$	13	
$k_{dec,}X_{aa}$	0.2	gün $^{-1}$	14	
$k_{dec,}X_{fa}$	0.2	gün $^{-1}$	15	
$k_{dec,}X_{c4}$	0.2	gün $^{-1}$	16	
$k_{dec,}X_{pro}$	0.2	gün $^{-1}$	17	
$k_{dec,}X_{ac}$	0.2	gün $^{-1}$	18	
$k_{dec,}X_{h2}$	0.2	gün $^{-1}$	19	

Tablo 4.10 Fiziko-kimyasal parametre değerleri

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
R	0.083145	bar M^{-1} K^{-1}		
T_{base}	298.15	K		
T_{op}	308.15	K	Kullanıcı tanımlı	
K_w	$exp\left(\frac{55900}{R \cdot 100} \cdot \left(\frac{1}{T_{base}} - \frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M 10^{-14}	≈2.08e-14	
$K_{a,va}$	10$^{-4.86}$	M	≈1.38e-5	
$K_{a,bu}$	10$^{-4.82}$	M	≈1.5e-5	

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
$K_{a,pro}$	$10^{-4.88}$	M	≈1.32e-5	
$K_{a,ac}$	$10^{-4.76}$	M	≈1.74e-5	
$K_{a,co2}$	$10^{-6.35}\ exp\left(\frac{7646}{R\cdot 100}\cdot\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M	≈4.94e-7	
$K_{a,IN}$	$10^{-9.25}\ exp\left(\frac{51965}{R\cdot 100}\cdot\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M	≈1.11e-9	
$k_{A,Bva}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
$k_{A,Bbu}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
$k_{A,Bpro}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
$k_{A,Bac}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
$k_{A,Bco2}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
$k_{A,BIN}$	1e10	M^{-1} gün $^{-1}$		
P_{atm}	1.013	bar		
$p_{gas,\ h2o}$	$0.0313\ exp\left(5290\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	bar	≈0.0557	
k_p	5e4	m^3 gün $^{-1}$ bar^{-1}		
$k_L{}^a$	200	d^{-1}		
$K_{H,co2}$	$0.035\ exp\left(\frac{-19410}{R\cdot 100}\cdot\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M_{liq} bar^{-1}	≈0.0271	
$K_{H,ch4}$	$0.0014\ exp\left(\frac{-14240}{R\cdot 100}\cdot\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M_{liq} bar^{-1}	≈0.00116	
$K_{H,h2}$	$7.8e-4\ exp\left(\frac{-4180}{R\cdot 100}\cdot\left(\frac{1}{T_{base}}-\frac{1}{T_{op}}\right)\right)$	M_{liq} bar^{-1}	≈7.38e-4	

Tablo 4.11 Fiziksel parametre değerleri

Parametre	Değer	Birim	Proses	Yorum
V_{liq}	3400	m^3		
V_{gas}	300	m^3		

4.6. ADM1 Modelinin Biyogaz Tesisine Adaptasyonu

ADM1 modeli temel olarak şehir şebekesi arıtma suyu çamurlarının havasız koşullarda ayrışmasının modellenmesi için geliştirilmiş olsa da bitkisel ve hayvansal kökenli atıkların havasız koşullarda ayrıştırılmasının modellenmesinde ve biyogaz elde edilmesinde kullanılabilmektedir. Ancak, bu

durumda bazı adaptasyonların yapılması gerekmektedir. Çalışma kapsamında biyogaz tesisisin hammaddesi olarak hayvansal gübre ve hal atıkları kullanılacaktır. Bu hammaddeler bazında ADM1 modelindeki hammadde özellikleri değiştirilerek kullanılmıştır. İlk olarak CSTR modeli kurulan sistem birbirine paralel çalışan iki çürütücü içerir hale getirilmiştir.

4.6.1. Uyarlanmış ADM1 Modeli

ADM1 modeline tasarlanan biyogaz sisteminin adaptasyonu için 2 temel işlem yapılmıştır. Bunlardan ilkinde ADM1 modelinde hem çözünebilir hem de partiküler maddeler konsantrasyon bazında verilmiş olup çalışmada kütle birimine çevrilme işlemi yapılmıştır. İkinci işlemde ise sabit hacim için geliştirilen ADM1 modeli değişken hacimli duruma yapılandırılmıştır. Bu sebeple ADM1 model kodları yeniden yazılmıştır. ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan parametreler Tablo 4.12'de, ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan durum değişkenleri ise Tablo 4.13'de verilmiştir.

Tablo 4.12 ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan parametreler.

İsim	**Tanımı**	**Birim**
T	Sıcaklık	K
P_atm	Atmosferik basınç	bar
P_H2O	Su buhar basıncı	bar
V_R	Fermentör hacmi	m^3
V_Const	Ayrışan atığın maksimum hacmi	m^3
A	Fermentör yüzey alanı	m^2
F_X_out	Fermentörü terk eden partikül maddenin fraksiyonu	%
KLa	Gaz-sıvı tranfer katsayısı	1/gün

Bahsedilen adaptasyon ve kod değişiklik işlemleri aşağıda verilmektedir.

$$\frac{dMi}{dt} = \text{ConversionTerm}_i - \text{Outflux}_i \tag{74}$$

$$C_i = \frac{M_i}{V_{gas}} (\text{if Vgas} > 0) \tag{74.1}$$

$$\text{Outflux}_i = C_i (Q_{in} - Q_{out}) + C_i . Q_{out,gas} \tag{75}$$

$$\begin{aligned} Q_{out} &= Q_{in} \ (\text{if } V > V_{const}) \\ &= 0 \quad (\text{if } V \leq V_{const}) \end{aligned} \tag{75.1}$$

$$Q_{out,gas} = \frac{R.T}{Patm - P_{H_2O}} .V.(\rho_{CH_4} + \rho_{CO_2} + \rho_{H_2}) \tag{76}$$

Burada,

M_i ve C_i = i' ninci gaz bileşeninin sırasıyla kütlesi ve konsantrasyonu

ConversionTerm$_i$ ve *Outflux*$_i$ = sırasıyla reaksiyon ve taşıma terimleri

ρ_i = i' nin ci gazın gaz transfer kinetiği (kmol m^{-3} gün^{-1})

t= zaman (gün)

Tablo 4.13 ADM1 modelinin adaptasyonunda kullanılan durum değişkenleri

İsim	**Tanımı**	**Birim**
pH	pH	-
V	Atık materyalin hacmi	m3
V_gas	Fermentör gaz depolama hacmi	m3
P_CH4	Metanın kısmi basıncı	bar
P_CO2	Karbondioksitin kısmi basıncı	bar
P_h2	Hidrojenin kısmi basıncı	bar
Q_out	Çıkış akışı	m3/gün
Q_Out_gas	Biyogaz akışı	m3/gün

ADM1 modelinde simülasyonları yapılabilmesi amacıyla ADM1 modeline girilen parametre ve değişkenler Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14 ADM1 modeline girilen parametre ve değişkenler.

Bileşenler	**Birimler**
Su	m^3/gün
S_{su}, S_{aa}, S_{fa},S_{va}, S_{bu}, S_{pro},S_{ac}, S_{h2}, S_{CH4},S_I, X_I, X_{xc}, X_{ch}, X_{pr},X_{li}, X_{su},X_{aa}, X_{fa}, X_{c4}, X_{pro}, X_{ac}, X_{h2}	kgCOD/m^3
S_{IC}, S_{IN}, S_{cat}, S_{an}, tüm iyonik türler	Kmol/m^3
*S_{CO2}, S_h_ion, S_NH4_ion	kgCOD/m^3

*Bu bileşenler giriş akış karakter matrisinin bir parçası değildir fakat pH hesaplamasında model içinde değerlendirilmektedir.

5. BİYOGAZ SİSTEMİ ENTEGRE ENERJİ SİSTEMİ MODELLEMESİ

Biyogaz içerisinde ihtiva ettiği metan gazı nedeniyle yanıcı bir gazdır ve yakıldığında çevreye enerji verir. Bu enerjiyi kullanmanın birçok yolu vardır; ısı kazanlarında, jeneratör ve ko-jeneratörlerde, mikro türbinlerde vb. Günümüzde entegre biyogaz sistemlerinin büyük bir kısmında ko-jeneratörler kullanılmaktadır. Ko-jeneratörler hem elektriğin hem de ısının birlikte kazanıldığı sistemlerdir. Elektriğin yanında ısının da kazanılıyor olması ko-jeneratörleri üstün kılan özelliktir. Normal bir jeneratörde yakıtın enerjisinin ancak %30-40'ı elektriğe dönüştürülebilirken, ko-jeneratörlerde ısı ile birlikte bu dönüşüm % 75-90 değerlerine kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, biyogaz elde edilirken çürütücülerin ihtiyaç duyduğu ısının da ko-jeneratörlerden sağlanması da ayrı bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında biyogazın entegre enerji sistemlerinde kullanımında 250 kW'lık bir ko-jeneratör kullanılması tasarlanmıştır. 250 kW'lık ko-jeneratörün simülasyonunda ASPEN HYSYS 2006 programı kullanılmıştır.

5.1. Model Denklikleri

Sürekli akış sistemi göz önüne alınarak model için kurulan kütle denklikleri aşağıdaki gibidir;

$$\sum M_{biogaz} + \sum M_{hava} = \sum M_{eksozgazı} \tag{77}$$

$$\sum M_{biogaz} = x_{CH_4} \bullet m_{CH_4} + x_{CO_2} \bullet m_{CO_2} + x_{H_2O} \bullet m_{H_2O} + x_{N_2} \bullet m_{N_2} + x_{O_2} \bullet m_{O_2} + x_{H_2} \bullet m_{H_2} + x_{NH_3} \bullet m_{NH_3} + x_{H_2S} \bullet m_{H_2S} \tag{78}$$

$$\sum M_{hava} = x_{O_2} \bullet m_{O_2} + x_{N_2} \bullet m_{N_2} + x_{H_2O} \bullet m_{H_2O} + x_{Ar} \bullet m_{Ar} \tag{79}$$

$$\sum M_{eksozgazı} = x_{CH_4} \bullet m_{CH_4} + x_{CO_2} \bullet m_{CO_2} + x_{H_2O} \bullet m_{H_2O} + x_{N_2} \bullet m_{N_2} + x_{O_2} \bullet m_{O_2} + x_{H_2} \bullet m_{H_2} + x_{Ar} \bullet m_{Ar} \tag{80}$$

M_{biogaz} = Motora giren biogaz toplam kütlesi (kg/s)

M_{hava} = Motora giren hava toplam kütlesi (kg/s)

$M_{eksozgazı}$ = Motor çıkışı eksoz gazının toplam kütlesi (kg/s)

m_{CH_4} = Metanın kütlesel debisi (kg/s)

m_{CO_2} = Karbondioksitin kütlesel debisi (kg/s)

m_{H_2O} = Suyun kütlesel debisi (kg/s)

m_{O_2} = Oksijenin kütlesel debisi (kg/s)

m_{H_2} = Hidrojenin kütlesel debisi (kg/s)

m_{NH_3} = Amonyak'ın kütlesel debisi (kg/s)

m_{H_2S} = Hidrojen Sülfürün kütlesel debisi (kg/s)

m_{Ar} = Argonun kütlesel debisi (kg/s)

x_{CH_4} = Metanın mol fraksiyonu

x_{CO_2} = Karbondioksitin mol fraksiyonu

x_{H_2O} = Suyun mol fraksiyonu

x_{O_2} = Oksijenin mol fraksiyonu

x_{H_2} = Hidrojenin mol fraksiyonu

x_{NH_3} = Amonyağın mol fraksiyonu

x_{H_2S} = Hidrojen Sülfürün mol fraksiyonu

x_{Ar} = Argonun mol fraksiyonu

Potansiyel ve kinetik enerjilerin ihmal edildiği durumda sistemin enerji denkliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q + W = \Delta E \tag{80}$$

$$\Delta E = E_{eksozgazı} - \left(E_{biogaz} + E_{hava}\right) \tag{81}$$

$$\Delta E = P.E_{eksozgazı} + K.E_{eksozgazı} - \left(P.E_{biogaz} + K.E_{biogaz} + P.E_{hava} + K.E_{hava}\right) \tag{82}$$

$$\Delta E = \left[((h^0_{eksozgazı} + h_{eksozgazı}) \bullet m_{eksozgazı}) - \left[((h^0_{biogaz} + h_{biogaz}) \bullet m_{biogaz}) + ((h^0_{hava} + h_{hava}) \bullet m_{hava})\right]\right] \tag{83}$$

$$Q = Q_{soğutma} + Q_{kayıp} \tag{84}$$

Q = Birim zamandaki ısı transfer miktarı (kW)

W = Motordan elde edilen elektrik işi (kW)

ΔE = İç enerji değişimi (kW)

$E_{eksozgazı}$ = Ekzosgazının toplam iç enerjileri (kW)

E_{biogaz} = Biogazın toplam iç enerjisi (kW)

E_{hava} = Havanın toplam iç enerjisi (kW)

$P.E_{eksozgazı}$ = Eksozgazının toplam iç potansiyel enerjisi (kW)

$P.E_{biogaz}$ = Biogazın toplam iç potansiyel enerjisi (kW)

$P.E_{hava}$ = Havanın toplam iç potansiyel enerjisi (kW)

$K.E_{eksozgazı}$ = Eksozgazının toplam iç kinetik enerjisi (kW)

$K.E_{biogaz}$ = Biogazın toplam iç kinetik enerjisi (kW)

$K.E_{hava}$ = Havanın toplam iç kinetik enerjisi (kW)

$h^0_{eksozgazı}$ = Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) eksozgazının oluşum entalpisi (kj/kg)

h^0_{biogaz} = Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) biogazlarının oluşum entalpisi (kj/kg)

h^0_{hava} = Oda koşullarında (25 °C ve 1 atm) beslenen havanın oluşum entalpisi (kj/kg)

$h_{eksozgazı}$ = Eksozgazı akışının entalpisi (kj/kg)

h_{biogaz} = Biogaz akışının entalpisi (kj/kg)

h_{hava} = Beslenen hava akışının entalpisi (kj/kg)

Ayrıca hava ve biogazın oda koşullarında sisteme girdiği varsayıldığında, enerji denkliği şu şekilde de ifade edilebilmektedir;

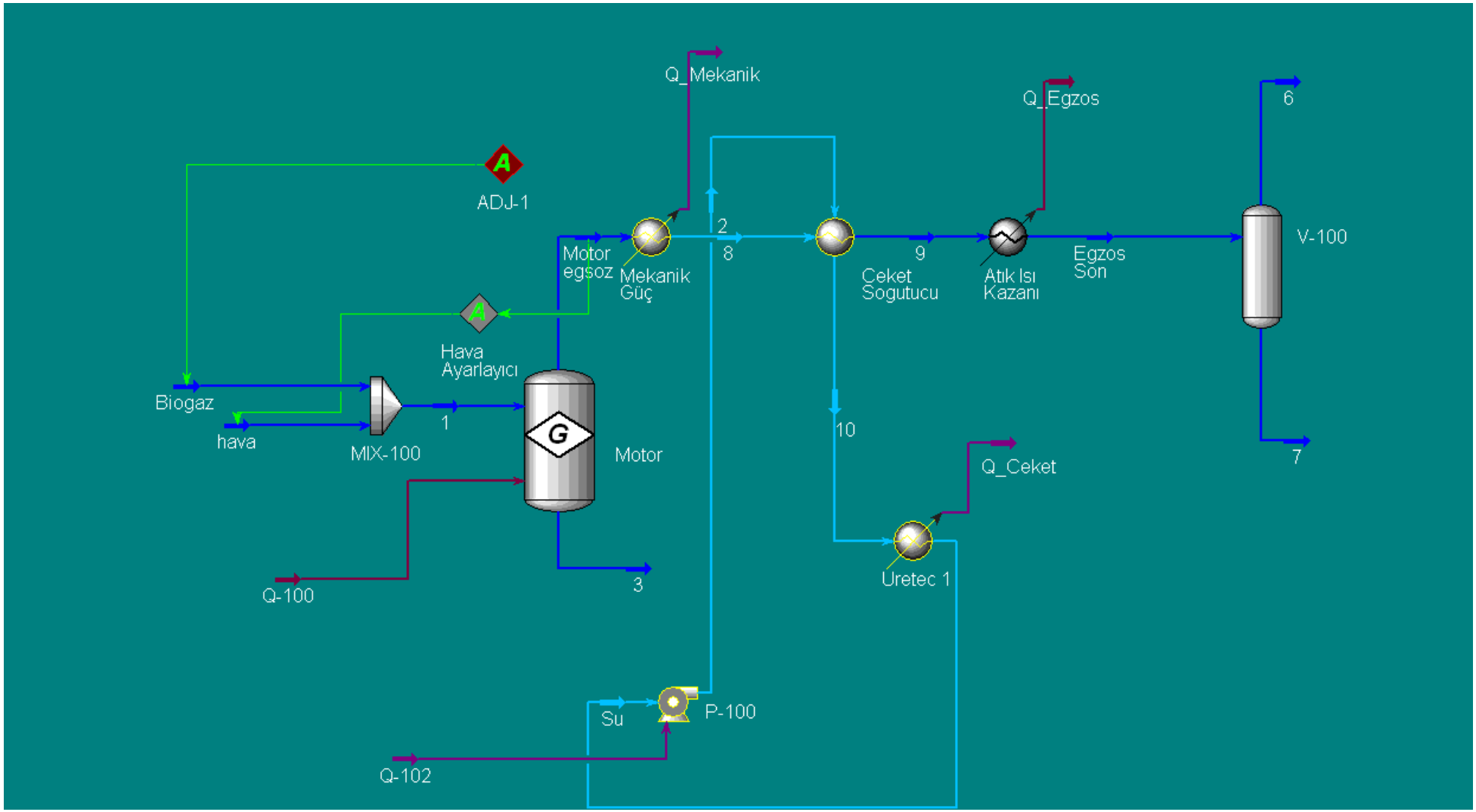
$$Q + W = \left|LHV_{biogaz}\right| \bullet m_{biogaz} - C_{P_{eksozgazı}} \bullet m_{eksozgazı} \bullet \Delta T \qquad (85)$$

LHV_{biogaz} = Biogazın alt ısıl değeri (kj/kg)

$C_{P_{eksozgazı}}$ = Eksozgazının çıkış sıcaklığındaki kütlesel ısı kapasitesi (kj/kg. °C)

5.2. Model İşletim Bilgileri

Enerji sistemlerinin modellemesinde motor verimleri bilindiğinden dolayı ASPEN HYSYS 2006 programı içerisinde Gibbs reaktörü kullanılmıştır. Gibbs reaktöründe tam yanma olduğu varsayılarak bilinen motor verimlerinden simülasyon çalıştırılmıştır. Ko-jeneratörün motor grubuna biyogazın 25 ºC ve 1 atm'de girdiği ve egzos gazının 180 °C'de çıktığı varsayılmıştır. Model HYSYS'de kurulduktan sonra biyogaz içindeki metan oranları, biyogaz besleme debileri, yakıt/hava oranları ve motor içindeki yanma oranlarının sistem performansına olan etkileri sırasıyla incelenmiştir.



Şekil 5.1 Ko-jeneratör grubu proses simülasyonu (ASPEN HYSYS 2006)

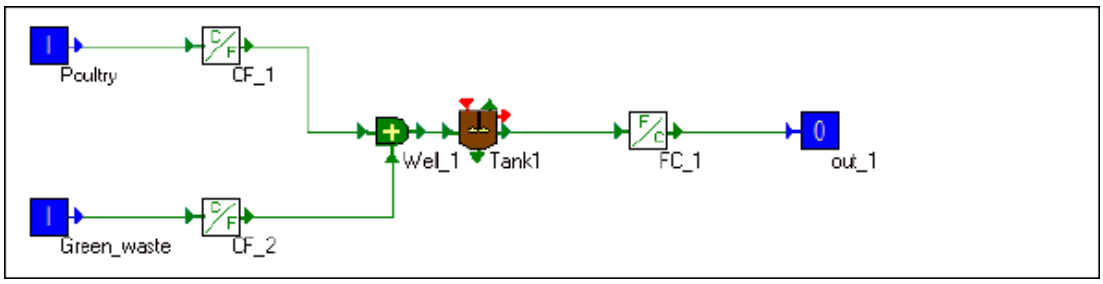
6. BİYOGAZ SİSTEMİ OPTİMİZASYONU

Bu çalışma dahilinde simülasyonu ADM1 ve HYSYS programlarında yapılmış sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon ADM1 modeli içerisindeki WEST simülatörü ile yapılmıştır. Biyogaz sistemi WEST programı içerisinde kurularak çeşitli kuru madde oranlarında farklı hacimsel debi yüklemeleri ile sitem karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir.

Optimizasyon çalışmasında WEST-ADM1 modelini kullanarak 5 farklı kuru madde oranlarında (9.0, 10.1, 11.2, 12.4, 13.6) ve farklı hacimsel debilerde (5, 10, 12.5 15, 20, 25 ve 35 m^3/gün) sadece bir fermentör için simülasyonlar yapılmıştır. Her bir simülasyonda günlük biyogaz, CH_4, CO_2 ve H_2'nin miktarları, pH, uçucu yağ asitleri (**S_ac**: Asetat, **S_bu**: Bütirat, **S_va**:Valerat ve **S_pro**:Propiyonat) ve biyokütle konsantrasyonlarının (**X_su**; şeker ayrıştırıcılar (sugar fermenters), **X_ac** ve **X_H_2**; acetotrophic ve hyrogenotrophic metanogenleri) zamana bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

6.1. Biyogaz Sisteminin WEST Simülatörüne Uyarlanması

ADM1 modeli atık su arıtma sistemleri için tasarlandığından dolayı bölüm 5'te de bahsedildiği üzere biyogaz sistemine uyarlanması gerekmektedir. Optimizasyon ve uyarlama dahilinde sadece bir tane fermantör göz önünde bulundurulmuştur. Biyogaz sisteminin WEST simülatörü içerisinde adapte edilmiş akış diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir. Hammadde bileşimi olarak ağırlıklı olarak tavuk gübresi alınmış ve poultry olarak ifade edilmiştir. Hammadde olarak ayrıca bitkisel atıklar girilmiştir. Fermantöre beslenen atık bileşimi 1:1 oranındadır. Bitkisel atık ve hayvansal atık karışımının hacimsel ağırlığı yaklaşık 1044 kg m^{-3} olarak alınmıştır.



Şekil 6.1 Biyogaz sisteminin WEST simülatöründeki akış diyagramı

Şekil 6.1'de gösterildiği üzere iki farklı tür atığın toplandığı Wel_1 noktası tanımlanmıştır. Bu noktadan fermantöre (Tank_1) besleme yapılmaktadır. Simülasyonlarda fermentöre hacimsel verdi (Q_{in}) olarak yükleme yapılacaktır. Çıktı olarak, Out_1 noktasından günlük biyogaz miktarı, pH, propiyonik asit, vb. özellikler zamana bağlı olarak elde edilmektedir.

6.2. Biyogaz Üretim Optimizasyonunun Yapılandırılması

Biyogaz üretim sistemlerinin optimizasyonu konusunda literatüre bakıldığında ağırlıklı olarak deneysel tipte çalışmalar olduğu gözlenmektedir. Modele dayalı çalışma kompostlaştırma şeklinde olsa biyogaz konusunda çok çok azdır.

Bu çalışmada kullanılacak optimizasyon modeli Gauss modeli tabanına dayanmaktadır. Kullanılacak Gauss modeli aşağıda verilmiştir.

$$\dot{m} = \dot{m}_{max} e^{-0.5\left[\frac{X-X_o}{b}\right]^2} \tag{86}$$

Burada,

$\dot{m}$ = Metan üretimi, m3/gün,

$\dot{m}_{max}$ = Maksimum metan üretimi m3/gün,

X = Gauss modelinde optimizasyonu gerçekleştirilecek bağımsız değişken. Bu çalışmada, kuru madde oranları ve hacimsel debiler kullanılacaktır.

Xo = Maksimum metan üretimini sağlayan X değeri.

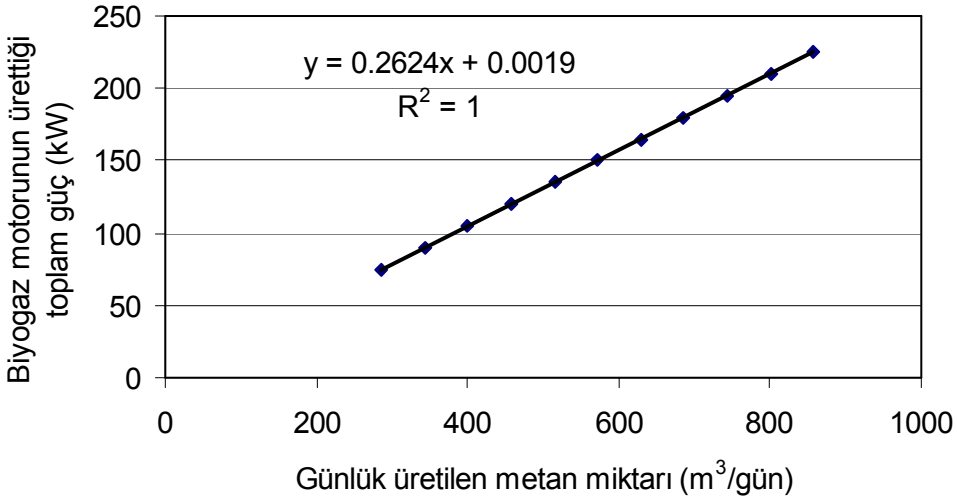
B = Gauss katsayısıdır.

Biyogaz üretiminin optimizasyonu için regresyon analizinde Gauss modelinin kullanılmasın nedenleri aşağıdaki gibidir;

- Yüksek ve düşük X değerlerinde, örneğin çok yüksek ve düşük kuru madde oranlarında, anaerobik ayrışma hiçbir zaman negatif metan üretimi olmaması ve Gauss modelinin bu yaklaşıma uygun olması,
- Metan üretiminin maksimum değerini sağlayan değişkenin optimum değerini vermesidir.

6.3. Enerji Üretim Sistemi Optimizasyonunun Yapılandırılması

Enerji üretim sistemlerinin optimizasyonunda da Gauss modeli temel alınmıştır. Tek bir fermantörde üretilen biyogazın kojeneratöre verilmesi ile elde edilen gücün metan miktarına bağlı grafiği aşağıdaki gibidir;



Şekil 6.2 Güç üretimin metan miktarı ile değişimi grafiği

Grafikten elde edilen denklem düzenlendiğinde;

$$G = 0.2624\dot{m} + 0.0019 \tag{87}$$

Burada;

G= Üretilen toplam güç miktarı, kW

Denklem 86 ve 87 birlikte düzenlendiğinde;

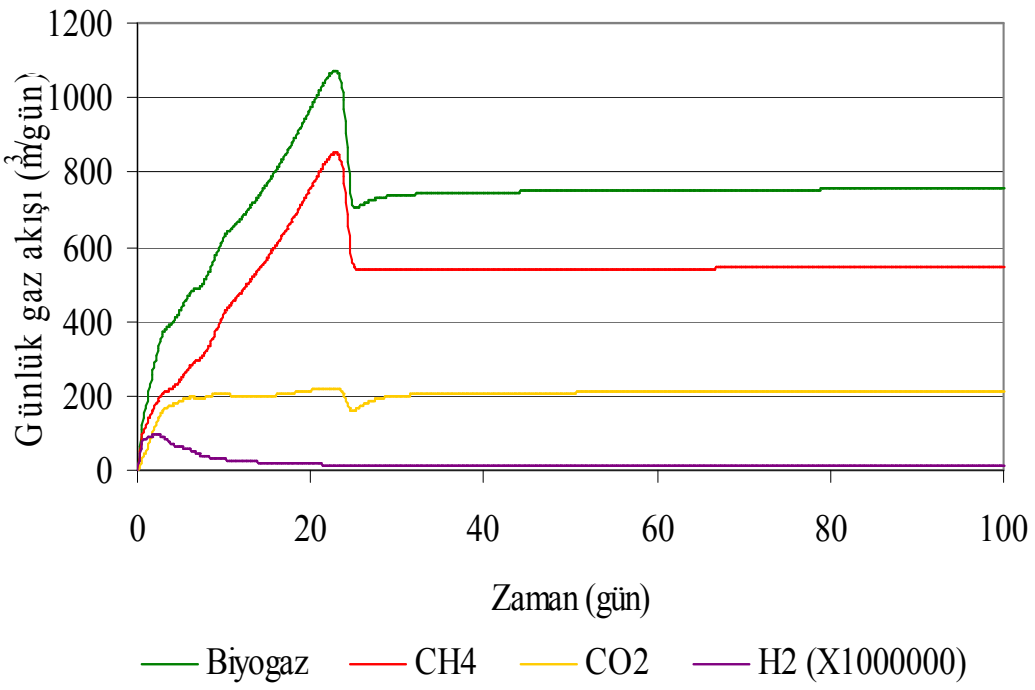
$$G = 0.2624\left[\dot{m}_{max} e^{-0.5\left[\frac{X - X_o}{b}\right]^2}\right] + 0.019 \tag{88}$$

Bu denklem kullanılarak maksimum güç üretimini sağlayan X değerlerini, örneğin kuru madde oranı değerlerini, bulmak mümkündür.

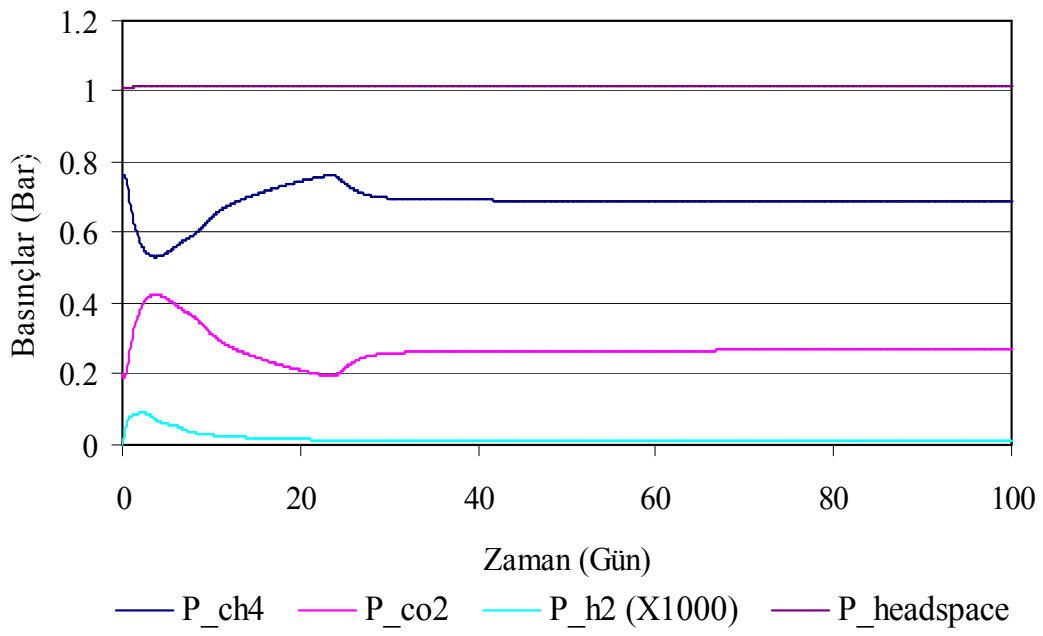
7. SİMİLASYON VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI

7.1. ADM-1 Modellemesi Sonuçları

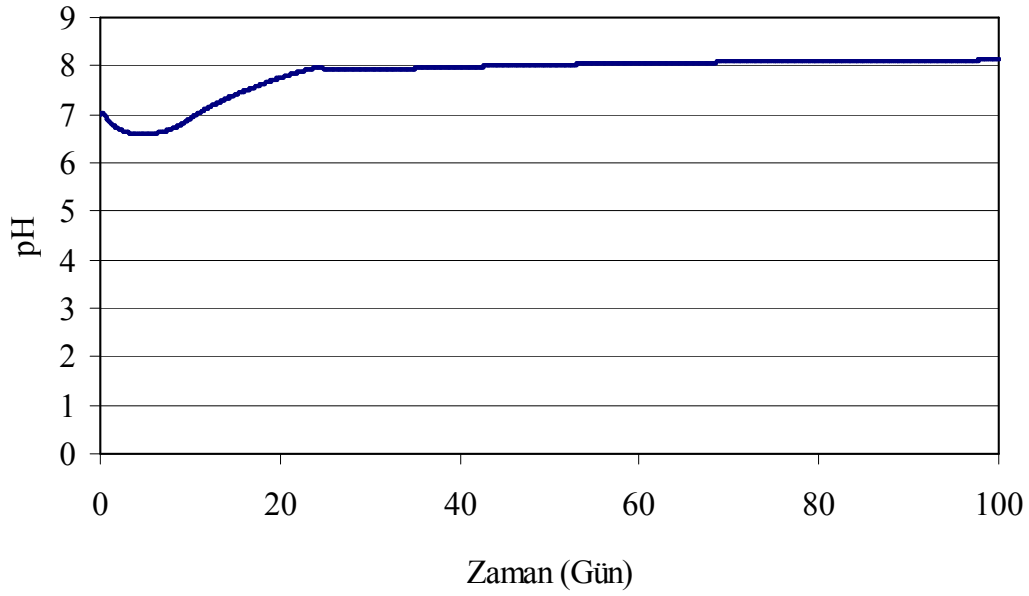
Giriş miktarları ve karakteristik özellikleri önceki bölümlerde tanımlanmış hammaddeler ile besleme yapıldığı durum için 100 günlük çalışma süresi içeren simülasyonlar çalıştırılmıştır. Burada vurgulanması gereken fermantör içerisinde çürüme olayını gerçekleşmesi için yeterince aşı maddesinin bulunduğu varsayımının yapıldığıdır. 100 gün çalıştırılan simülasyonlar kararlı hal (steady state) durumunda geçerlidir. Simülasyonlar sonucunda metan, karbondioksit ve hidrojen üretim debilerinin zamanla değişimi, gaz depolama alanında gazların kısmi basınçlarının zamanla değişimi, uçucu yağ asitlerinin zamanla değişimi, pH'ın zamanla değişimi ve biyokütle konsantrasyonun zamanla değişimi incelenmiş ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir;



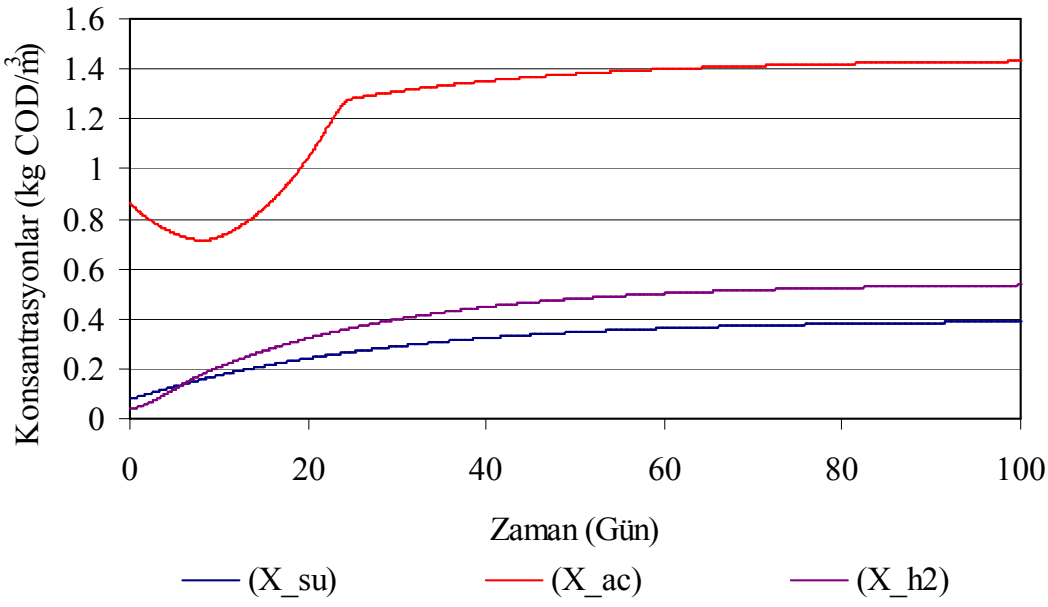
Şekil 7.1 Günlük elde edilen biyogazın zamanla değişimi



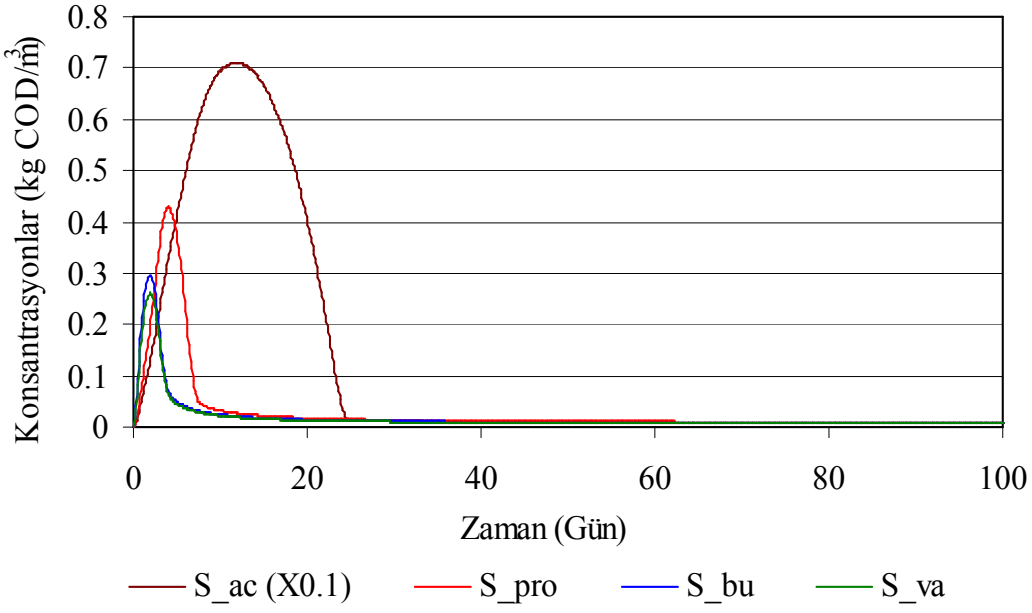
Şekil 7.2 Gaz depolama alanında gazların kısmi basınçlarının zamanla değişimi



Şekil 7.3 pH'ın zamanla değişimi



Şekil 7.4 Biyokütle konsantrasyonunun zamanla değişimi



Şekil 7.5 Uçucu yağ asitlerinin zamanla değişimi

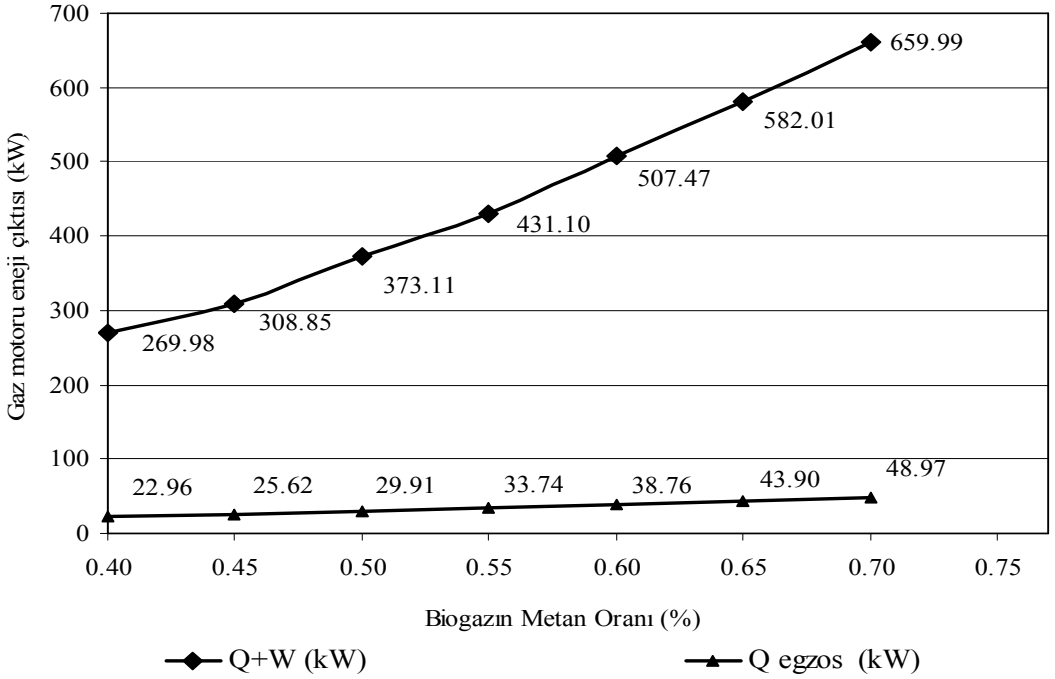
ADM-1 simülasyonları sonucunda 1080 m^3/gün'lük biyogaz üretimi elde edileceği hesaplanmıştır. Kararlı haldeki biyogaz debisi ise 750 m^3/gündür. Biyogaz içersindeki en önemli parametrelerden biri olan metan oranı ise %70 olarak bulunmuştur. Biyogaz içerisinde metan ile karbondioksitin debileri birbirinin zıttı miktarlarda gitmesi beklenen durumdur. Sonuçlar çerçevesinde

bu bilgiye paralel olarak metan ve karbondioksitin artış ve azalışlarının birbirlerini tamamlayıcı nitelikte olduğu belirgindir. Çalışma süresince pH incelendiğinde, pH'ın biyogaz üretim doğasına paralel olarak baştan bir miktar düştüğü sonradan ise sistemin kendini toparlayarak kararlı durumda 7.5-8 aralığında kaldığı gözlenmektedir. Biyokütle konsantrasyonları pH düşüşüne hassasiyet göstermektedir. pH'ın düştüğü noktalarda biyokütle konsantrasyonları da düşmüştür. pH'ın kararlı olduğu durumlarda da biyokütle konsantrasyonu kararlı halde kalmıştır. Uçucu yağ asitlerinin durumlarının zamanla değişimi incelendiğinde ise metana dönüşen ana madde olan asetik asit konsantrasyonun pH ve günlük biyogaz üretim miktarlarına paralellik gösterdiği izlenmiştir.

7.2. Biyogaz Sistemi Entegre Enerji Sistemi Modellemesi Sonuçları

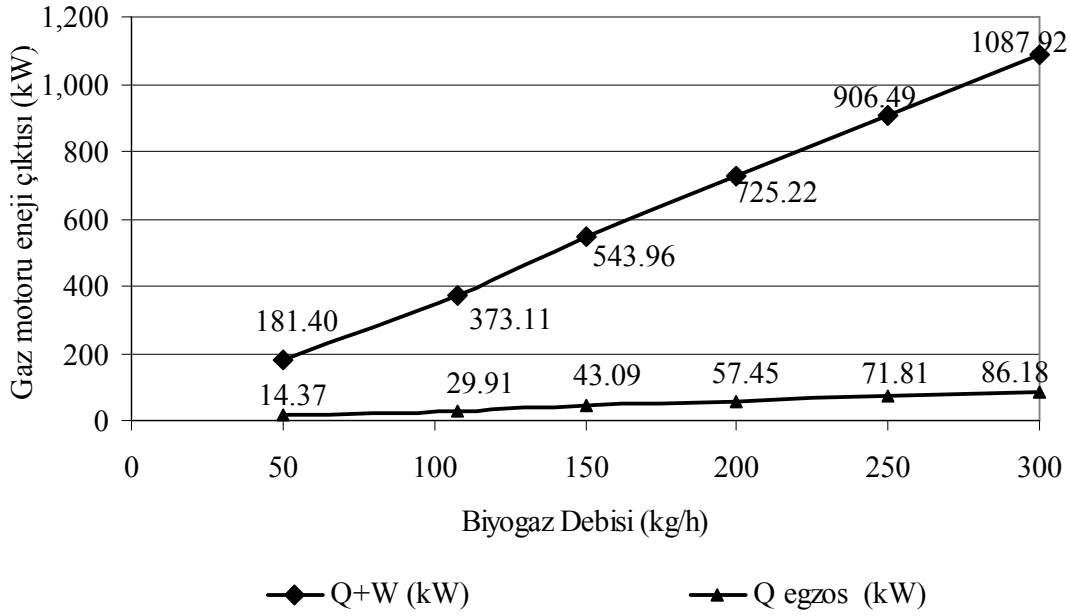
Biyogaz sistemi entegre enerji sistemleri modellemesinde biyogaz içerisindeki metan oranları, biyogaz debileri, yakıt hava karışım oranı, motor içindeki yanma oranları değişimlerine karşılık ko-jeneratör grubundan alınacak enerji miktarlarındaki değişimler analiz edilmiştir.

Biyogaz içerisindeki metan oranı zamanla değişebilmektedir. Simülasyon sonucunda oluşabilecek bu değişimlerin entegre enerji sisteminde oluşturacağı sonuçlar grafik halinde sunulmuştur. Grafik içerisinde ve diğer grafiklerde, **Q** motordan olan soğutma ve ısı kayıplarını ve **W** jeneratörden alınan işi gösterirken, $\mathbf{Q_{egsoz}}$ çıkış sıcaklığındaki egzosdan ısı kayıplarını göstermektedir. Biyogazın içindeki metan oranının fonksiyonu olarak biyogaz motoru-jeneratör grubundan elde edilen işin (kW) ve kayıpların değişimi grafiği Şekil 7.6'daki gibidir.



Şekil 7.6 Biyogaz metan oranı değişimi ile ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve kayıpların değişimi

Biyogaz debisindeki değişimlerin ko-jeneratörden çıkan enerjiye ve kayıplara olan etkisi 50 kg/h'lık artışlar halinde 300 kg/h'a kadar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7 Biyogaz debisi değişimi ile ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve kayıpların değişimi

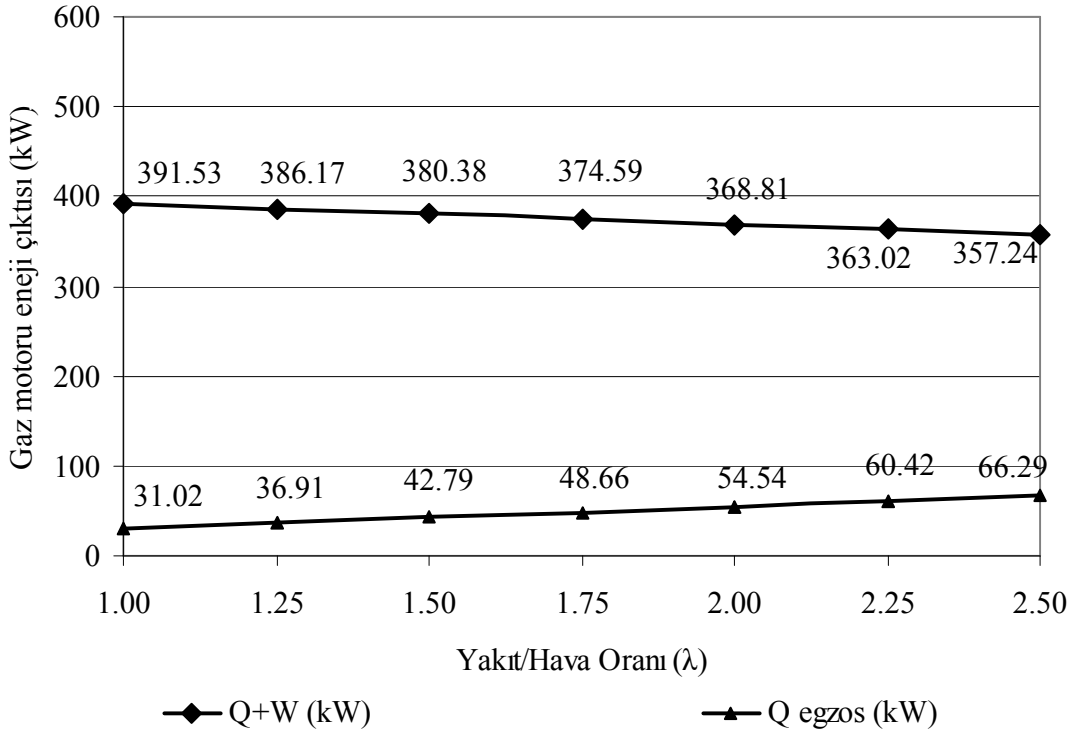
Biyogazın kullanılacağı entegre enerji sistemlerinde bulunan ko-jeneratörlerin etkinliğinde önemli bir parametre yakıt hava oranıdır. Yakıt hava oranı (λ) şu şekilde ifade edilebilir;

$$\lambda = \frac{C_{feed,O2}\dot{m}_{feed}}{C_{feed,O2}\dot{m}_{feed} - C_{drain,O2}\dot{m}_{drain}} \tag{89}$$

$C_{feed,O2}$ = Taze havanın oksijen içeriği (kg/kg)

$C_{drain,O2}$ = Egzoz havasının oksijen içeriği (kg/kg)

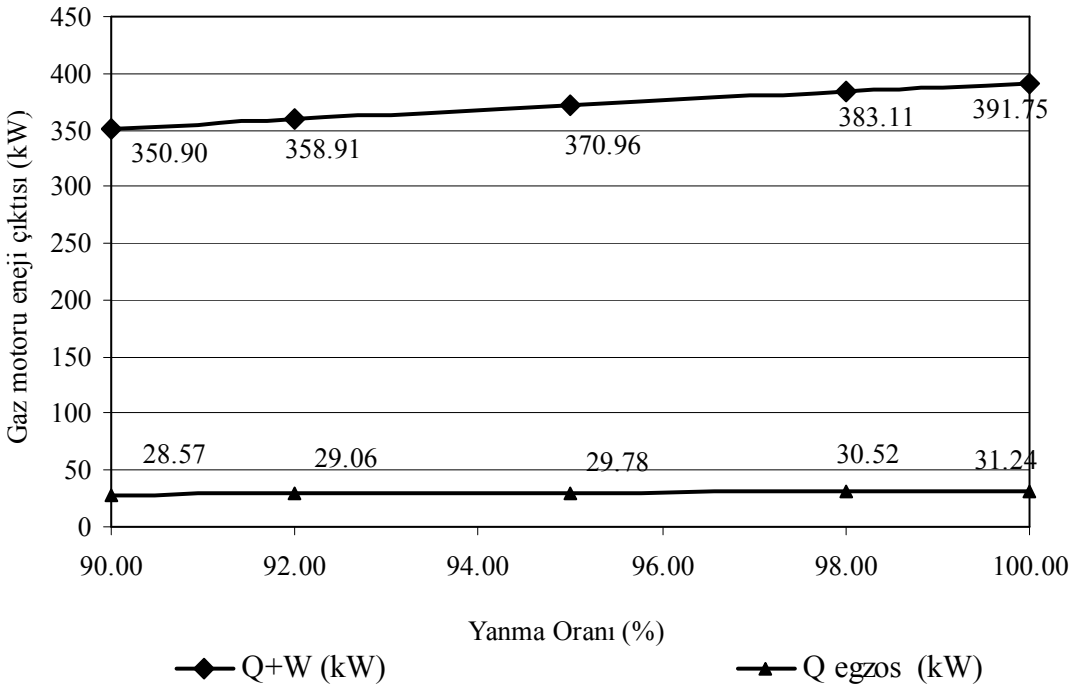
Değişen yakıt hava oranının (λ) elde edilen Q+W ve egzos ısı kayıplarına etkisi Şekil 7.8'deki gibidir. Şekil 7.8'deki grafiğe istinaden yakıt hava oranının artırılması sistemden elektrik ve soğutma yoluyla elde edilecek enerji miktarı azaltmaktadır. Bunun sebebi fazla olarak gönderilen havanın egzos gazı olarak çıkarken sistemden ısı enerjisini alarak çıkmasıdır.



Şekil 7.8 Yakıt/Hava oranının fonksiyonu olarak ko-jeneratörden çıkan enerjinin ve enerji kayıplarının değişimi

Motor içerisindeki yanma oranı ko-jeneratörün verimini dolayısıyla biyogazdan elde edilecek enerji miktarını etkilemektedir. Kimyasal ve

termodinamik sebeplerden dolayı %100 yanma gerçekleştirememektedir. Ancak, son yıllarda yapılan teknolojik değişiklikler ile %98 yanma değerine kadar çıkılabilmiştir. Motor seçiminde göz önünde bulundurulacak bu parametrenin değişimin ko-jeneratörden çıkan enerjiye ve kayıplara olan etkisi Şekil 7.9'daki gibidir.



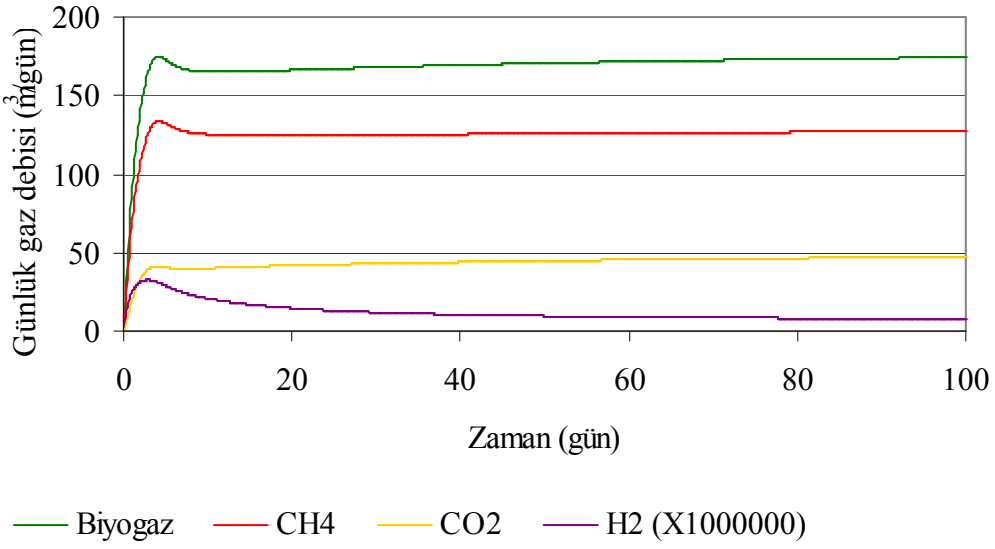
Şekil 7.9 Yanma oranın ko-jeneratörden çıkan enerjiye ve kayıplara değişimi

7.3. Biyogaz Sistemi Optimizasyon Sonuçları

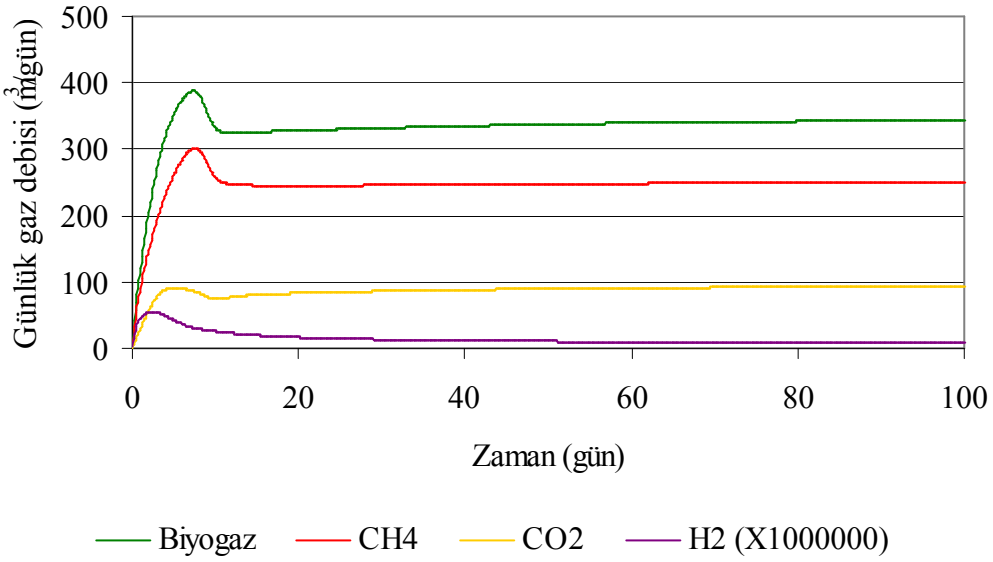
7.3.1. % 9 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar

Biyogaz tesisinde kullanılacak hammaddenin % 9 oranında kuru madde (KM) içeriği olacak şekilde beslendiği durum için çeşitli hacimsel debilerde denemeler yapılmıştır. Hacimsel debilerin 5, 10, 15, 20, 25 ve 35 m^3/gün olarak değiştirildiği durumlarda elde edilecek biyogaz miktarları incelenerek % 9 kuru madde oranında optimum besleme debisi ve bekletme süresinin bulunması hedeflenmiştir. Şekil 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14 ve 7.15'te artan besleme debilerinde günlük biyogaz üretiminin metan, karbondioksit ve hidrojen gazlarına göre dağılım sonuçları verilmiştir.

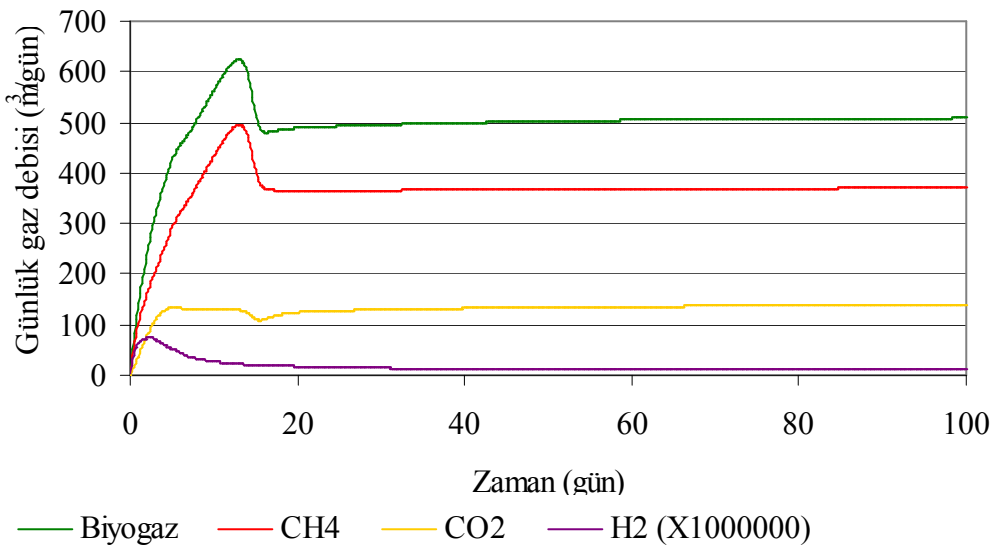
Besleme miktarlarının arttırılmasıyla günlük elde edilen biyogaz miktarı 25 m^3/gün değerine kadar artmış, fakat bu değerden sonra azalış göstermiştir. Bunun nedeni aşırı yükleme ile fermantör içerisindeki biyokimyasal dengenin bozulmuş olmasıdır. 25 m^3/gün hacimsel besleme değerinde elde edilen biyogaz debisi 605 m^3/gündür.



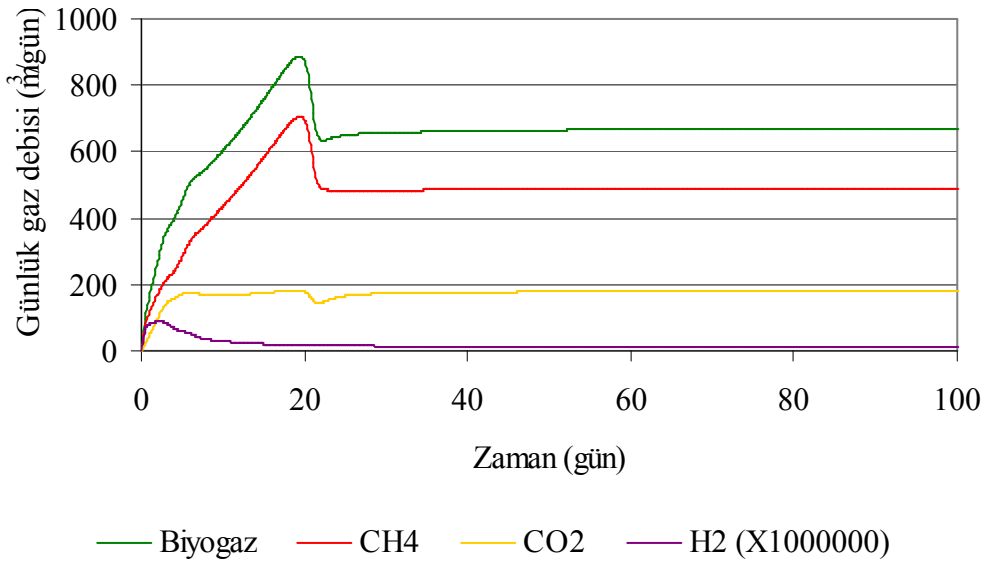
Şekil 7.10 %9 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



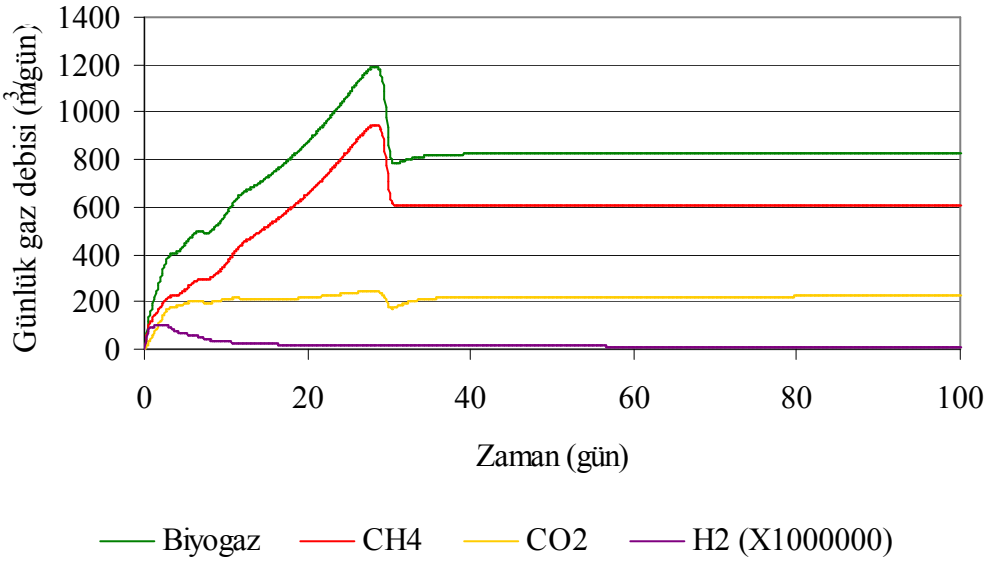
Şekil 7.11 %9 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



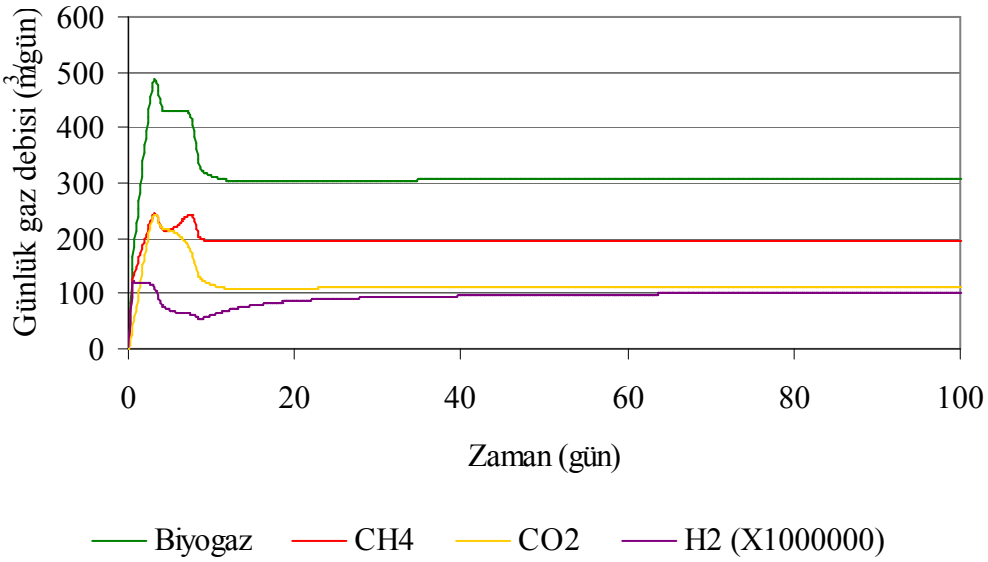
Şekil 7.12 %9 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.13 %9 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.14 %9 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



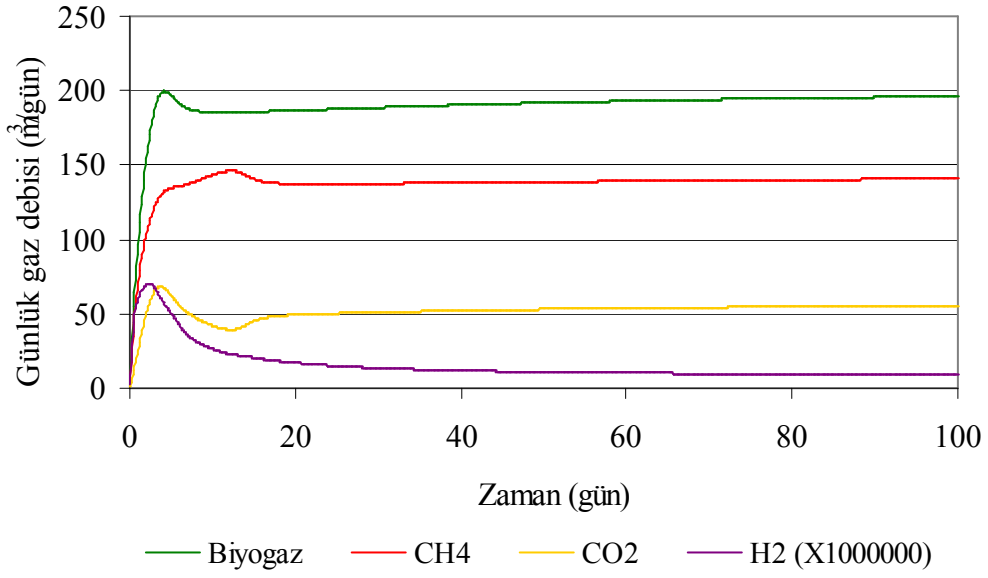
Şekil 7.15 %9 KM ve 30 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

Optimum bekletme süresine bakıldığında ise günlük besleme debisinin optimum olduğu durumdaki bekletme süreleri karşılaştırılmalıdır. Bu durumda, Şekil 7.14'ten de anlaşılacağı üzere günlük elde edilen gaz debisinin maksimum olduğu gün olan 30. Gün optimum bekletme süresidir. Bu günden sonraki günlerde gaz çıkışı devam etmesine karşın fermantör birim hacmine ve beslenen hammadenin birim hacmine karşılık elde edilen

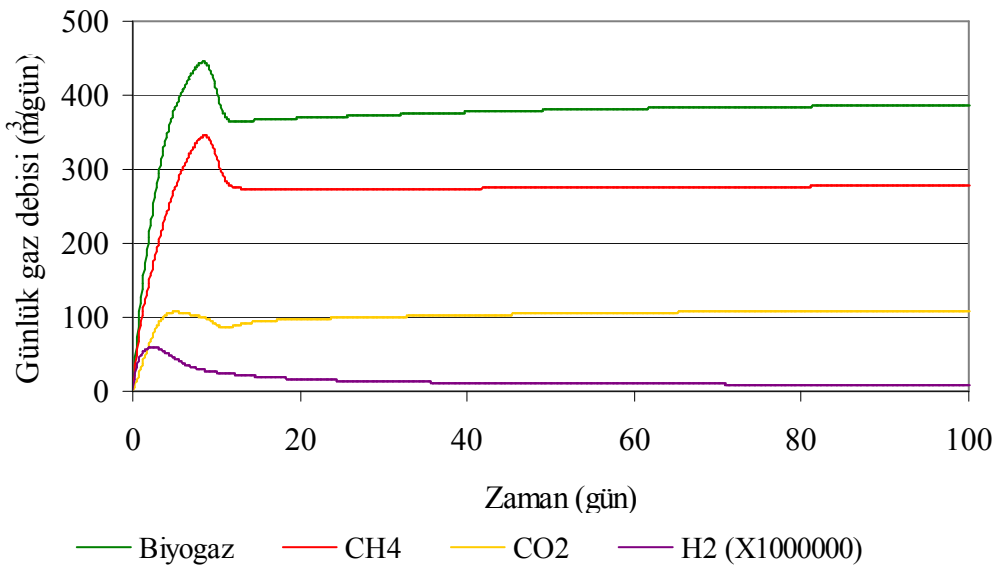
biyogaz miktarı düşmeye başlamasından dolayı optimum bekletme süresi olarak alınmamıştır.

7.3.2. % 10.1 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar

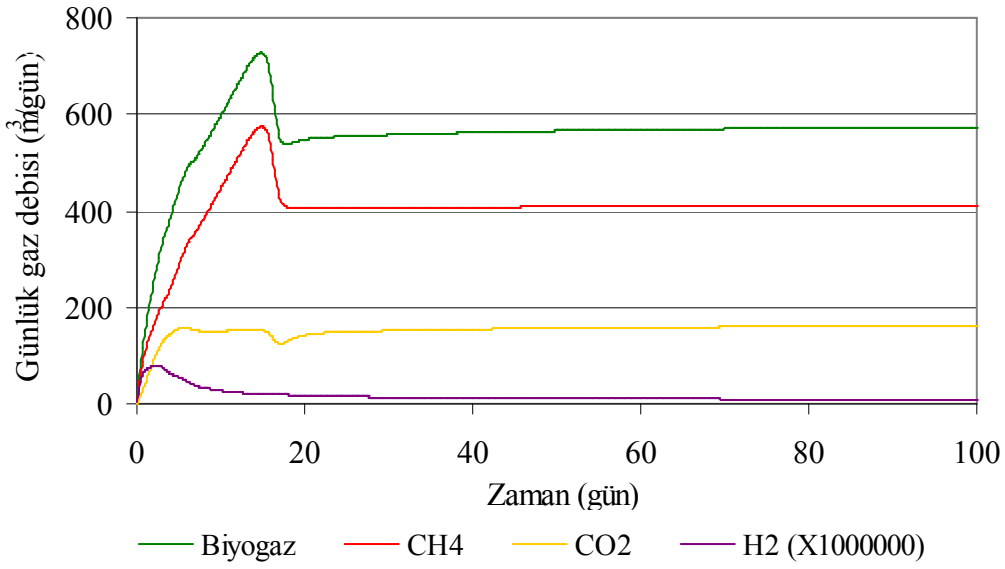
Beslenen hammaddenin % 10.1 oranında kuru madde (KM) içerdiği durumda besleme miktarları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Besleme debilerin 5, 10, 15, 20 ve 25 m^3/gün olarak değiştirildiği durumlarda elde edilecek biyogaz miktarları incelenerek % 10.1 kuru madde oranında optimum besleme debisi ve bekletme süresinin bulunması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.16, 7.17, 7.18, 7.19 ve 7.20'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar artan besleme debilerinde günlük biyogaz üretiminin metan, karbondioksit ve hidrojen gazlarına göre dağılım grafikleri halinde sunulmuştur.



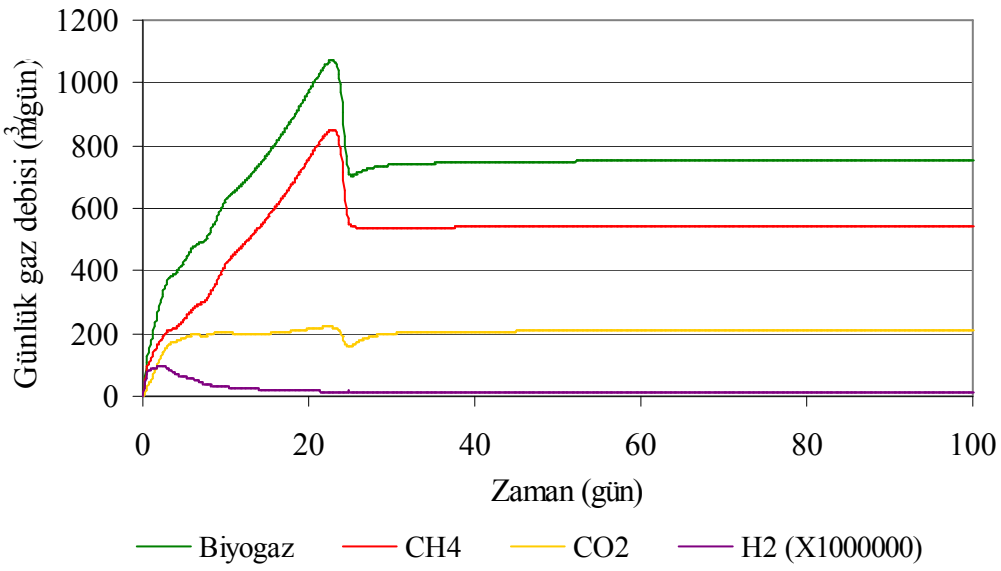
Şekil 7.16 %10.1 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



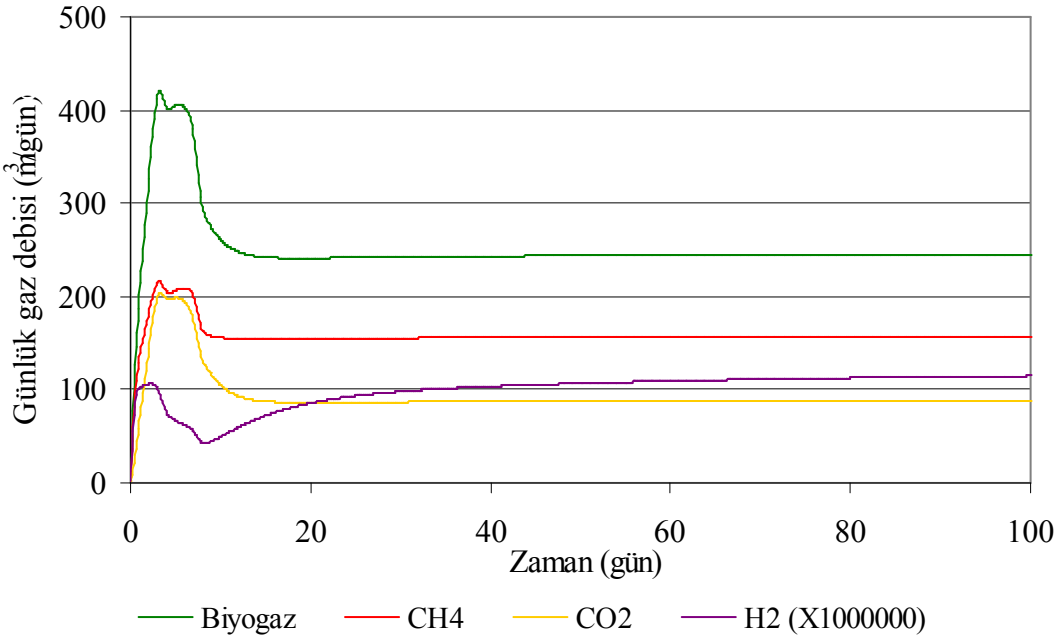
Şekil 7.17 %10.1 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.18 %10.1 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.19 %10.1 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



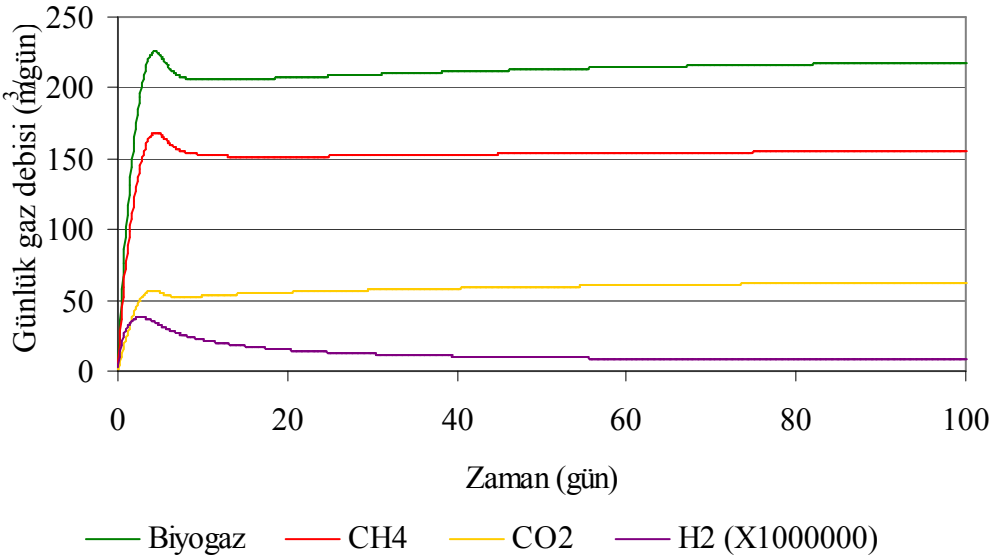
Şekil 7.20 %10.1 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

Elde edilen sonuçlar ışığında biyogaz debisinin maksimum olduğu hacimsel besleme debisi 20 m^3/gün olduğu gözlenmiştir. %9 KM oranıyla

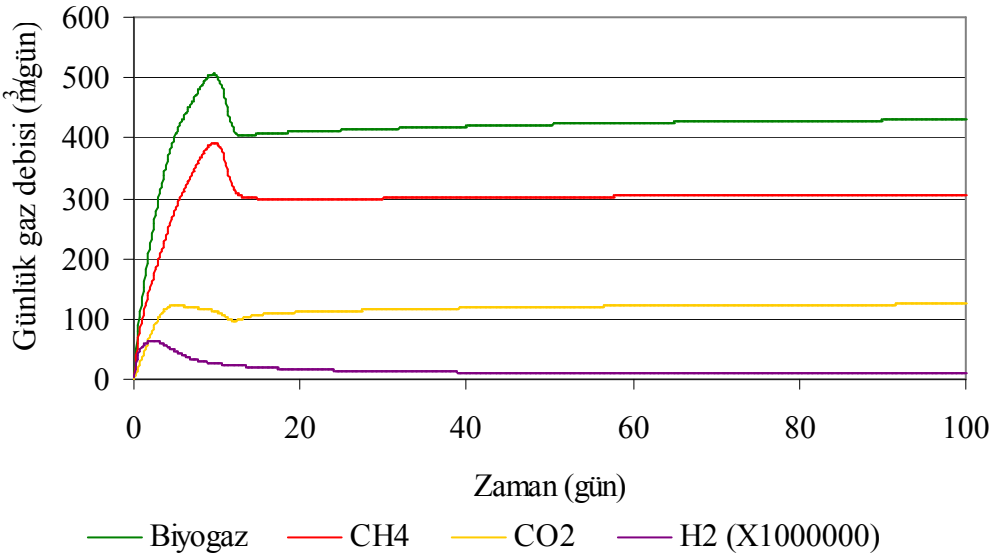
yapılan denemelerdeki gibi biyogaz debisi belli bir besleme debisi değerine kadar artış göstermiş fakat bundan sonra ise fermantör içi dengenin fazla yükleme ile bozulmasıyla azalmaya başlamıştır. 20 m^3/gün besleme debisi için çıkan biyogaz debisi 540 m^3/gündür. 20 m^3/gün debi ile besleme durumda optimum bekletme süresi incelendiğinde verilerin maksimum gaz debisinin elde edildiği gün olan 23. günü işaret ettiği gözlenmiştir.

7.3.3. % 11.2 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar

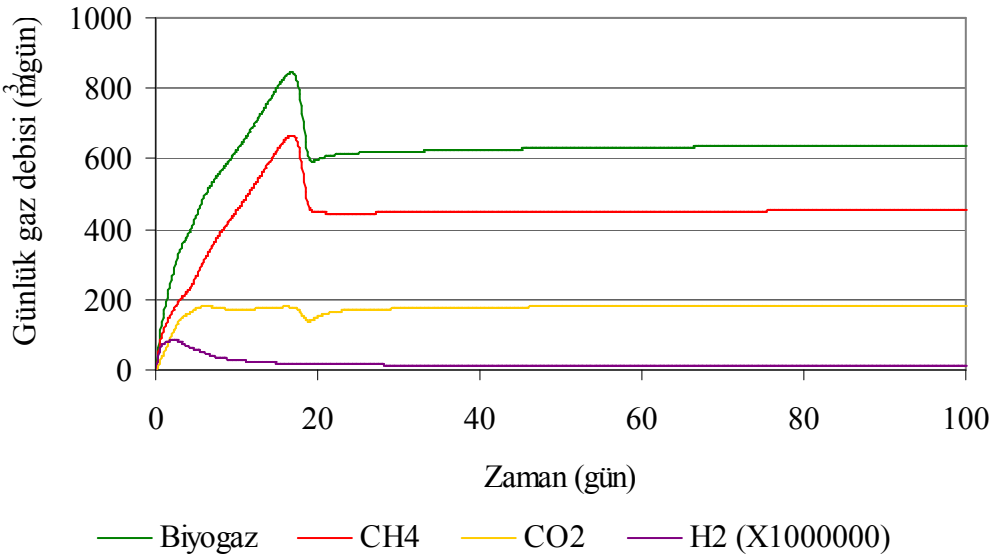
Kullanılacak hammaddenin % 11.2 oranında kuru madde (KM) içeriği olacak şekilde beslendiği durum için çeşitli hacimsel debilerde denemeler yapılmıştır. Hacimsel debilerin 5, 10, 15, 20 ve 25 m^3/gün olarak değiştirildiği durumlarda elde edilecek biyogaz miktarları incelenerek % 11.2 kuru madde oranında optimum besleme debisi ve bekletme süresinin bulunması hedeflenmiştir. Şekil 7.20, 7.21, 7.22, 7.23 ve 7.24'te artan besleme debilerinde günlük biyogaz üretiminin metan, karbondioksit ve hidrojen gazlarına göre dağılım sonuçları verilmiştir.



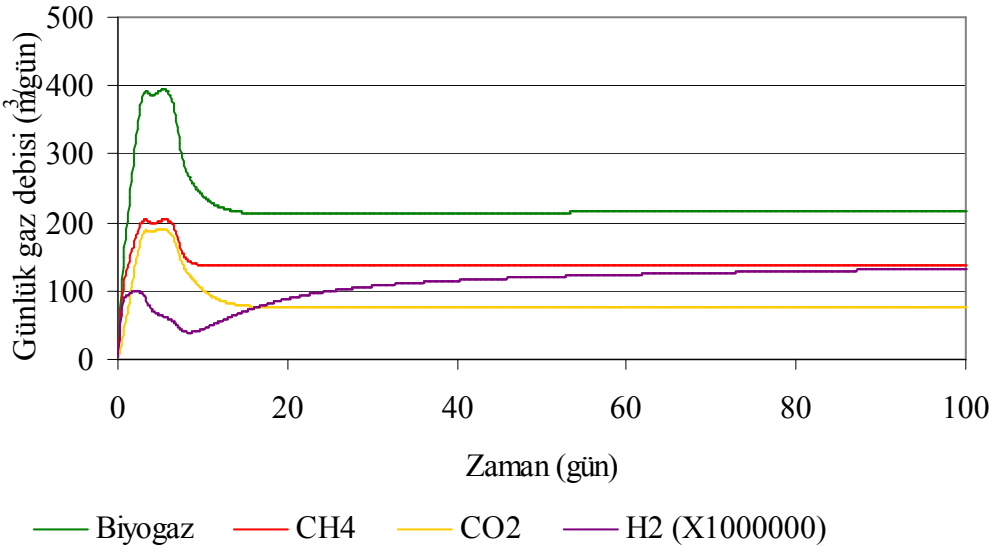
Şekil 7.21 %11.2 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



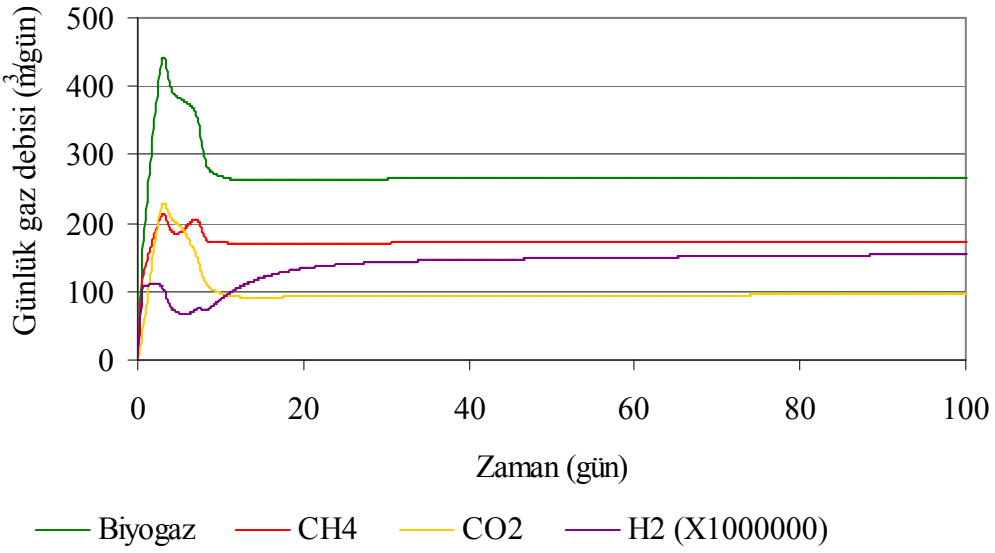
Şekil 7.22 %11.2 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.23 %11.2 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.24 %11.2 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



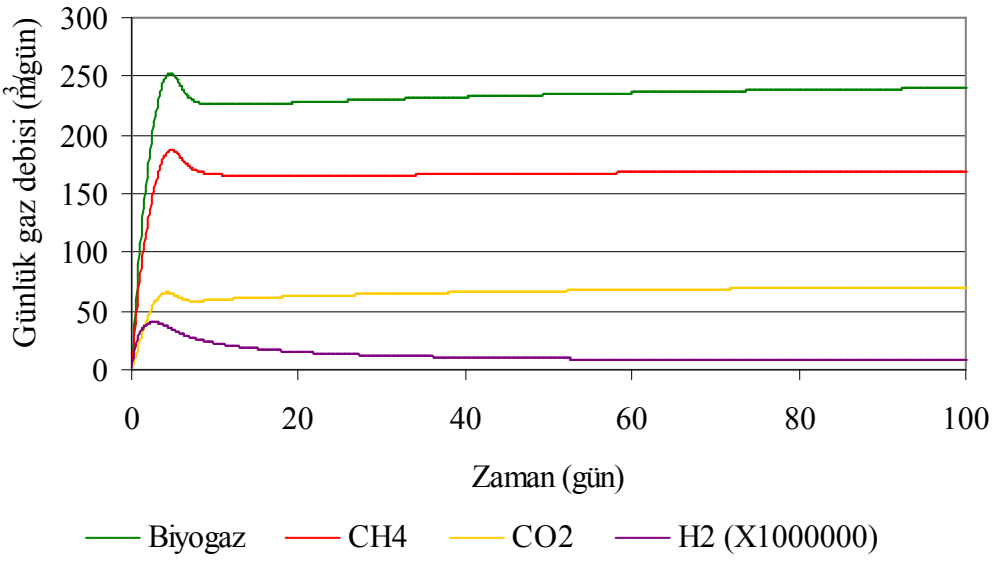
Şekil 7.25 %11.2 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

Grafiklerde sabit kuru madde oranında ve artan hacimsel debilerde, günlük biyogaz, CH_4, CO_2 ve H_2'nin zamana bağlı olarak değişimi verilmektedir. Günlük biyogaz üretim miktarı hacimsel debinin artışından etkilenmiştir. Hacimsel debinin artışı ile günlük üretilen metan miktarı artmış

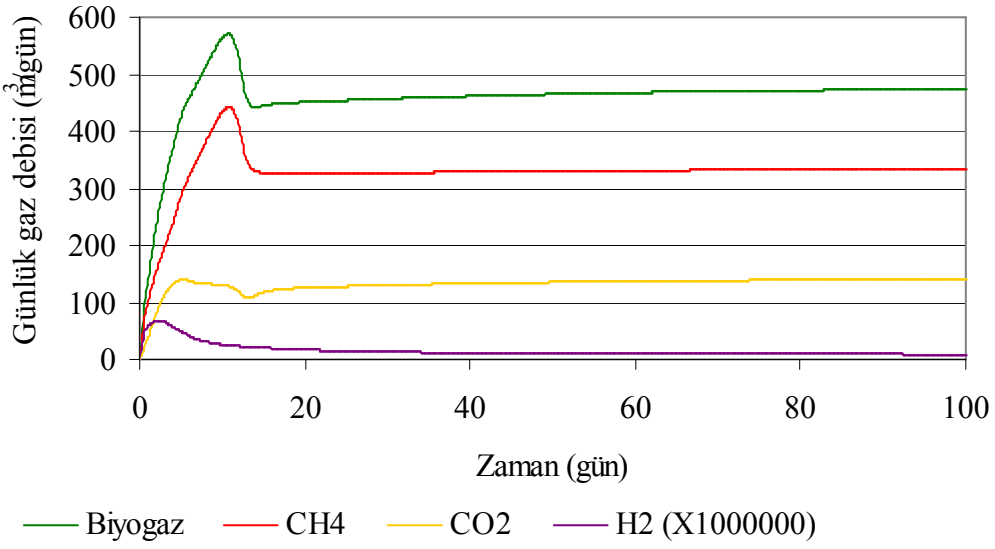
olup 15 m^3/gün debi değerinde maksimum değeri olan 820 m^3/gün değerine ulaşmıştır. Hacimsel debinin bu değerden daha fazla artması ise aşırı yüklemeden dolayı metan üretim değerini azaltmıştır. 15 m^3/gün debi değerinde gözlenen optimum bekletme süresi ise 19. gündür.

7.3.4. % 12.4 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar

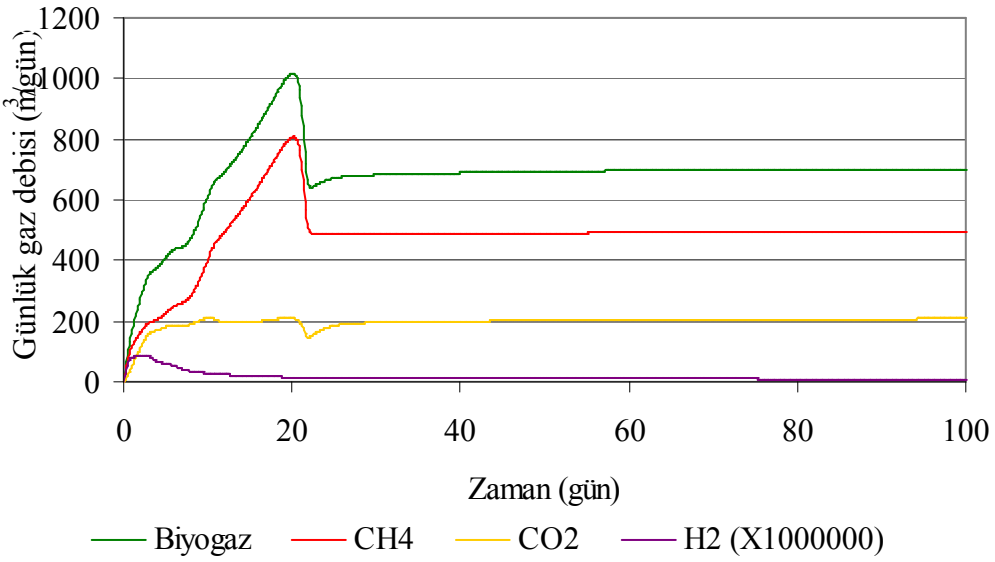
Beslenen hammaddenin % 12.4 oranında kuru madde (KM) içerdiği durumda besleme miktarları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Besleme debilerin 5, 10, 15 ve 25 m^3/gün olarak değiştirildiği durumlarda elde edilecek biyogaz miktarları incelenerek % 12.4 kuru madde oranında optimum besleme debisi ve bekletme süresinin bulunması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.26, 7.27, 7.28 ve 7.29'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar artan besleme debilerinde günlük biyogaz üretiminin metan, karbondioksit ve hidrojen gazlarına göre dağılım grafikleri halinde sunulmuştur.



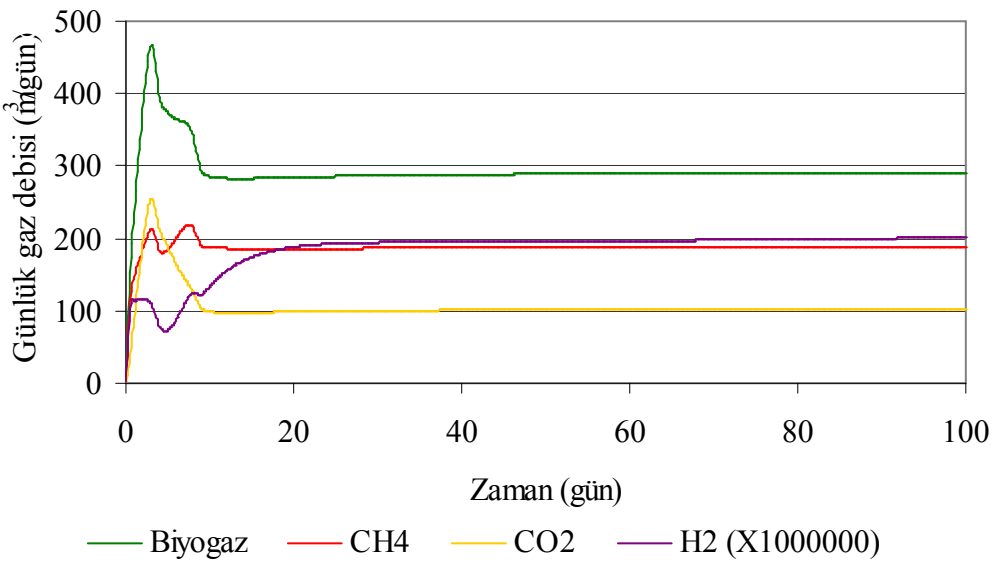
Şekil 7.26 %12.4 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.27 %12.4 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.28 %12.4 KM ve 15 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

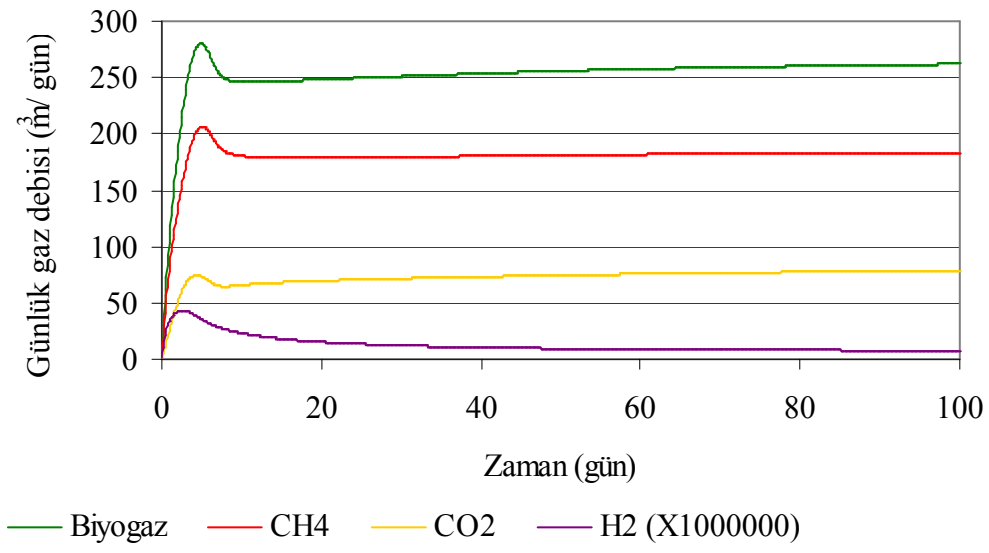


Şekil 7.29 %12.4 KM ve 25 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

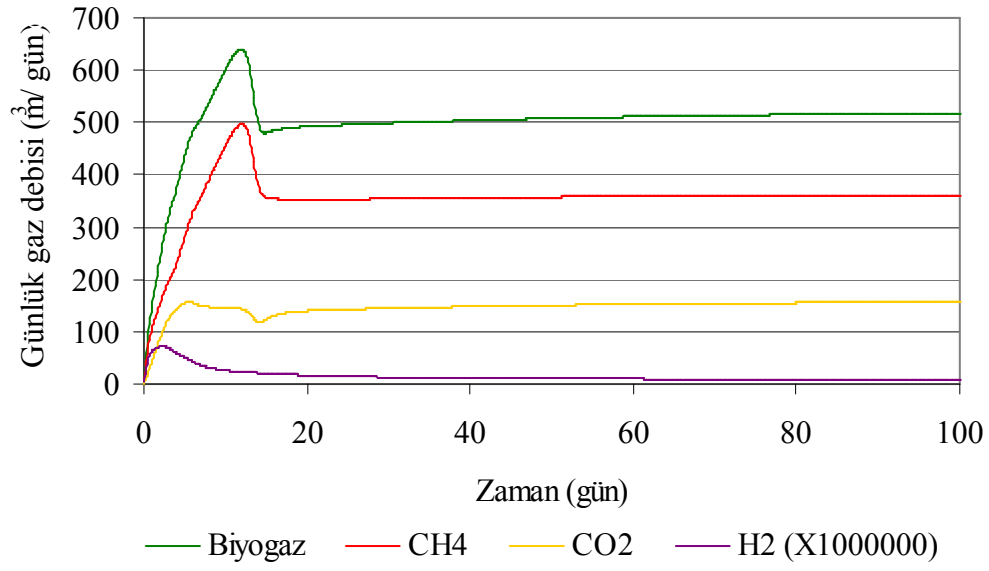
Elde edilen sonuçlar ışığında biyogaz debisinin maksimum olduğu hacimsel besleme debisi 15 m^3/gün olduğu gözlenmiştir. %12.4 KM oranıyla yapılan denemelerdeki gibi biyogaz debisi belli bir besleme debisi değerine kadar artış göstermiş fakat bundan sonra ise fermantör içi dengenin fazla yükleme ile bozulmasıyla azalmaya başlamıştır. 15 m^3/gün besleme debisi için çıkan biyogaz debisi 1020 m^3/gündür. 15 m^3/gün debi ile besleme durumda optimum bekletme süresi incelendiğinde verilerin maksimum gaz debisinin elde edildiği gün olan 20. günü işaret ettiği gözlenmiştir.

7.3.5. % 13.6 Oranında Kuru Madde İçin Sonuçlar

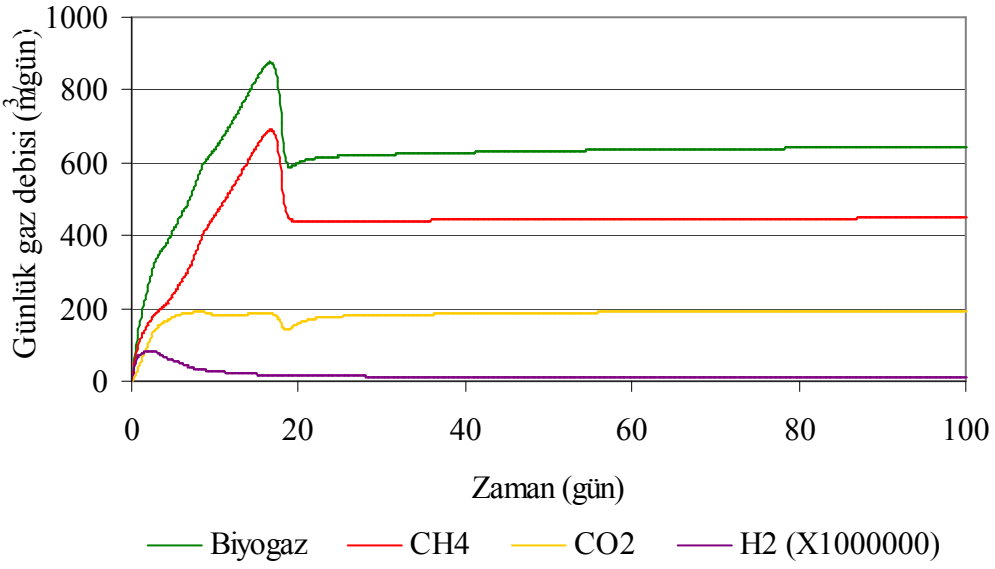
Kullanılacak hammaddenin % 13.6 oranında kuru madde (KM) içeriği olacak şekilde beslendiği durum için çeşitli hacimsel debilerde denemeler yapılmıştır. Hacimsel debilerin 5, 10, 12,5 ve 20 m^3/gün olarak değiştirildiği durumlarda elde edilecek biyogaz miktarları incelenerek % 13.6 kuru madde oranında optimum besleme debisi ve bekletme süresinin bulunması hedeflenmiştir. Şekil 7.30, 7.31, 7.32, 7.33'te artan besleme debilerinde günlük biyogaz üretiminin metan, karbondioksit ve hidrojen gazlarına göre dağılım sonuçları verilmiştir.



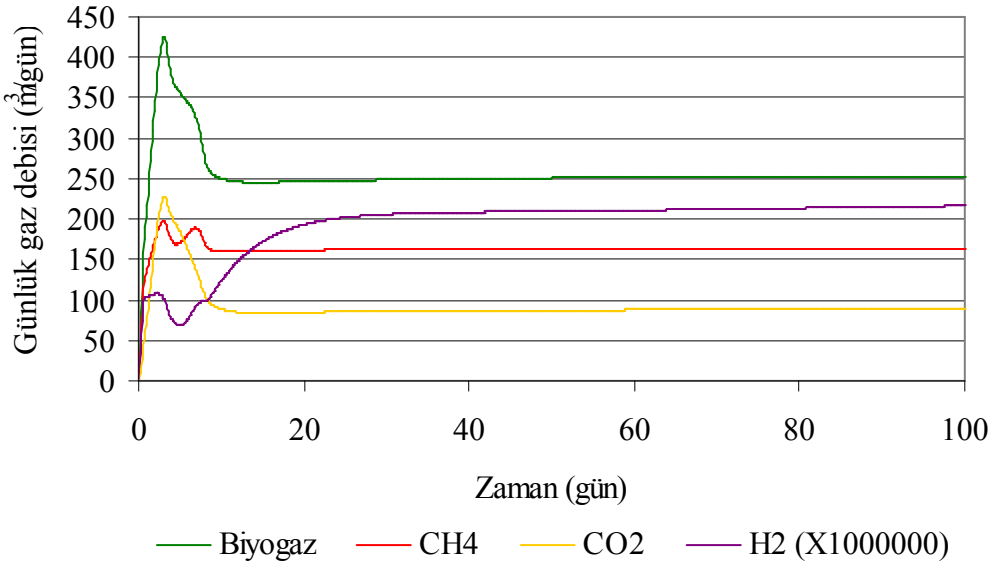
Şekil 7.30 %13.6 KM ve 5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.31 %13.6 KM ve 10 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.32 %13.6 KM ve 12.5 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi



Şekil 7.33 %13.6 KM ve 20 m^3/gün besleme debisinde günlük gaz debisinin değişimi

Besleme miktarlarının arttırılmasıyla günlük elde edilen biyogaz miktarı 12.5 m^3/gün değerine kadar artmış, fakat bu değerden sonra azalış göstermiştir. Bunun nedeni aşırı yükleme ile fermantör içerisindeki biyokimyasal dengenin bozulmuş olmasıdır. 12.5 m^3/gün hacimsel besleme değerinde elde edilen biyogaz debisi 880 m^3/gündür. Bu besleme durumunda gözlenen optimum bekletme süresi 18. gündür.

8. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Tez kapsamında, bitkisel ve hayvansal atıklar kullanılarak biyogaz üretim ve elde edilen gazın entegre enerji dönüşüm sisteminde kullanım simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlar ADM 1 ve ASPEN HYSYS programlarında yürütülmüştür. Hammadde besleme oranı olarak 1:1 (Hayvansal:bitkisel) alınmıştır. ADM1 modeli, karışımın protein, lipit, karbonhidrat ve inert kısımlarına bağlı olarak değiştirilmesine rağmen, kinetik, biyokimyasal ve fiziksel parametreler modelde tanımlandığı gibi kalmıştır. Çalışmalar süresince sisteme herhangi bir dengeleme amaçlı pH'a müdahale yapılmamış, sistem doğal sürecinde çalıştırılmıştır.

Modellemeler sonucunda belirlenen koşullarda biyogaz üretim sistemi ile elde edilebilecek biyogaz miktarı ve biyogaz içeriği hesaplanmıştır. Hesaplanan günlük biyogaz miktarı 1080 m^3'tür. Biyogazın içeriği % 70 oranında metan (CH4), %29 oranında karbondioksit (CO2) ve geri kalan % 1'lik kısım hidrojen, hidrojen sülfür, azot olduğu bulunmuştur.

Yapılan çalışmalar ışığında çok kapsamlı bir model olan ADM 1 modelinin biyogaz üretim sistemlerinin simülasyonunda kullanılabilir bir modeldir. Ancak, mevcut materyal karışımına göre ADM 1 modeline giriş parametrelerinin (kinetik, biyokimyasal ve fiziksel) adaptasyonunun sağlanması gerekmektedir. Ayrıca, sürekli beslemeli sistemler için sabit hacimli tasarlanmış ADM 1 modeli değişken hacme uyarlanarak kullanılabilir.

Çalışmalar sonucunda kullanılan hammaddenin karakteristiğinin modelleme çalışmalarında çok önemli olduğu belirlenmiştir. Giriş karakteristikleri için hammadde karışımının direk olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerini analiz etmektense, bileşenlerin ayrı ayrı kimyasal ve fiziksel özeliklerinin tespit edilip karışım oranındaki yüzdelerine göre belirleme yapmak daha uygun olmaktadır.

Elde edilen biyogazın entegre enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılması simülasyonları doğrultusunda metanın biyogaz içerisindeki oranı arttıkça yanma için gereksinim duyduğu oksijen (O_2) miktarı dolayısıyla hava

miktarı artmaktadır. Ayrıca metan oranının artmasıyla ortaya çıkan enerji miktarı da artmaktadır. Metanın biyogaz içerisindeki oranı arttıkça karbondioksitin (CO_2) biyogaz içerisindeki oranı düştüğünden dolayı CO_2 oranının çıkan enerjiye ters oranda etki ettiği belirlenmiştir. Yakıt hava oranının biyogazdan elde edilen enerjiye etkisine bakıldığında ise artan yakıt hava oranlarında elde edilen enerjide düşüş gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak fazla gönderilen havanın egzos gazı olarak çıkarken sistemden ısı alarak çıkmasıdır sonucuna varılmıştır.

5 farklı kuru madde oranı (9.0, 10.1, 11.2, 12.4, 13.6) ve farklı hacimsel debilerde (5, 10, 12.5 15, 20, 25 ve 35 m^3/gün) simülasyonlar kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum hammadde kuru madde oranının % 12.4 kuru madde ve bekletme süresinin 20 gün olduğu bulunmuştur. Ayrıca, optimizasyon çalışmaları ışığında sabit hacimsel debide kuru madde miktarının artırılması ile metan üretiminin arttığı ve belirli bir noktadan sonra düştüğü sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] ÜLTANIR, M.Ö., "Kapıdaki Elektrik Darboğazı ve Sektörün Geleceği", *İstanbul Sanayi Odası Dergisi*, 480, 30-36, 2006

[2] KAYA, D., "Renewable energy policies in Turkey", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 10, 152-163, 2006

[3] TEİAŞ, Türkiye Üretim-İletim İstatistikleri

[4] ÇAĞLAYAN, E., ATAÇ, Ö., ÇOBAN, V., "Biyoenerji Heryerde", *Bilim Teknik Dergisi*, Mayıs 2009

[5] MCCARTY, P.L., "Anaerobic Waste Treatment Fundementals", *Public Works,* 95, 9-12, 1964.

[6] ARNOTT, M., 1985, "The Biogas/Biofertilizer Business Handbook", *Peace Corps, Information Collection and Exchange*, Reprint R-48, 3th Ed.

[7] MARCHAİM, U., 1992, "Biogas Processes for Sustainable Development", *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, İtalya.

[8] LUSK, P., 1998, "Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook", *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/SR-580-25145

[9] http://www.albiyobir.org.tr/biyogaz04.htm

[10] KALIA, A.K. and SINGH, S.P., "Effect of Mixing Digested Slurry on the Rate of Biogas Production from Dairy Manure in Batch Fermenter", *Energy Sources*, 711-715, 2001

[11] BUJOCZEK, G., OLESZKIEWICZ, J., SPARLING, R. and CENKOWSKI S., "High solid anaerobic digestion of chicken manure" *Journal of Agricultural Engineering Research,* 76, pp-51-60, 2000

[12] YALDIZ, O., "Biyogaz Teknolojisi", Akdeniz Üniversitesi Yayın No: 78, Akdeniz Üniversitesi Basımevi, Antalya, 2004

[13] ELANGO, D., PULIKESI, M., BASKARALINGAM, P., RAMAMURTHI, V., SIVANESAN, S., Production of biogas from municipal solid waste with domestic sewage, *Journal of Hazardous Materials,* 141, 301–304, 2007

[14] FERNANDEZ A., FONT, X., SANCHEZ, A., "Anaerobic co-digestıon of organıc fraction of municipal solid wastes and industrial greases", *Organic Waste Treatments*: Safety Implications

[15] HUTNAN, M., DRTIL, M. and MRAFKOVA, L., “Anaerobic Biodegrability of Sugar Beet Pulp”, *Biodegration 11, Kluwer Academic Publishers*, Printed in Netherland, 203-211, 2001

[16] POUECH, P., FRUTEAU, H, and BEWA, H., “Agricultural Crops for Biogas Production on Anaerobic Digestion Plants”, *1st World Conference on Biomas for Energy and Industry. Proceeding of The Conference Held in Spain.* 5-9 June 2000 James&James Science Publishers Ltd. ISBN 1902916158, 163-165, 2000

[17] ÖZTÜRK İ., “Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları”, *Birsen Yayınevi*, Ağustos 1999, Eyüp

[18] MC CARTY, “One Hundred Years of Anaerobic Treatment”, in proceedings of the 2nd Int. Symp. On Anaerobic Digestion. Eds. D.E. Huges, D.A. Stafford at al, Elsevier Biomedical pres

[19] EKİNCİ K., “Evaluation of Decomposition Rate, Airflow Rate and Ammonia Control of Short Paper Fiber with Broiler Litter and Sulfuric Acid” *Master Thesis*. Department of Food, Agricultural, and Biological Engineering, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1997

[20] SALMİNEN E., RİNTALA J., “Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste –a review”, Biores. Technol. 83: 13-26, 2002

[21] SALMİNEN E., RİNTALA J., “Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse aste: effect of hydraulic retention time and loading” *Wat. Res.* 36: 3175-3182, 2002

[22] LÜBKEN et al., “Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops” *Wat. Res*. In pres, 2007

[23] GÜNGÖR-DEMİRCİ G., DEMİRER G.N., “ Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature, and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure.” Biores. Technol. 93: 109-117, 2004

[24] BUFFİERE, P.; LOİSEL, D.; BERNET, N.; DELGENES, J.-P. “ Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties”, Water Sci. Technol. (G.B.), 53(8), 233-241, 2006

[25] BATSTONE, D.J., KELLER, J., ANGELİDAKİ, I., KALYUZHNYİ, S., PAVLOSTATHİS, S., ROZZİ, A., SANDERS, W., SİEGRİST, H., and VAVİLİN, V. “ The IWA Anaerobic Digestion Model No1. Wat. Sci. Tech.”, 45(10), 63-73, 2002

[26] ROSEN, C. and JEPPSSON, U. “Description of the ADM1 for benchmark simulations”, Technical Report, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation (IEA), Lund University, Lund, Sweden, 2006

ÖZGEÇMİŞ

Volkan ÇOBAN 1981 yılında Edirne'de doğdu. İlköğretimini İstiklal İlkokulu ve Atatürk Ortaokulu'nda ve liseyi Edirne Fen Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında başladığı APS Ambalaj ve Paketleme Sanayi'ndeki Üretim Mühendisliği görevinden 2007 yılında ayrılarak TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi'nde araştırmacı olarak çalışmaya başladı. Buradaki görevi halen sürmektedir ve 2007 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü'nde başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.