

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(DOKTORA TEZİ)

KIRSAL KESİME YÖNELİK BİR BİYOGAZ SİSTEMİNİN
TASARIMI, KURULUMU, TESTİ VE PERFORMANSINA
ETKİ EDEN PARAMETRELERİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet ERYAŞAR
Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Bilim Dalı Kodu: 625.05.04
Sunuş Tarihi:10.9.2007

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Sayın Ahmet ERYAŞAR tarafından DOKTORA TEZİ olarak sunulan **“Kırsal Kesime Yönelik Bir Biyogaz Sisteminin Tasarımı, Kurulumu, Testi ve Performansına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması ”**başlıklı bu çalışma, E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 10.09.2007 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı	; Prof.Dr. Günnur KOÇAR.....
Raportör	; Prof.Dr. Arif HEPBAŞLI.....
Üye	; Doç.Dr. Hayati OLGUN.....
Üye	; Prof.Dr. Ali GÜNGÖR.....
Üye	; Doç.Dr. Gülden GÖKÇEN AKKURT.....

ÖZET

KIRSAL KESİME YÖNELİK BİR BİYOGAZ SİSTEMİNİN TASARIMI, KURULUMU, TESTİ VE PERFORMANSINA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN ARAŞTIRILMASI

ERYAŞAR, Ahmet

Doktora tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Eylül, 2007, 272 Sayfa

Biyogaz sistemleri, dünyada, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler tarafından yoğun şekilde kullanılan, ekonomik ve teknik yönden yetkinliklerini kanıtlamış sistemlerdir. Ülkemiz, biyogaz üretiminde girdi olarak kullanılan organik atıklar yönünden, büyük bir potansiyele sahiptir. Buna rağmen, ülkemizde biyogaz sistemleri yaygınlaşamamıştır. Özellikle 80’li yıllarda, kırsal kesime yönelik olarak başlatılan yoğun yaygınlaştırma çalışmaları, ülkemizin sosyo-ekonomik ve teknolojik yapısına uymayan, verimi düşük ve emek yoğun sistem seçimleri nedeniyle başarısız olmuştur. Bu başarısızlıkta rol oynayan diğer bir faktör ise biyogaz sistemlerinin son kullanıcılara ve teknik elemanlara yeterince anlatılamamasıdır.

Bu çalışmada, kırsal kesime yönelik, yüksek verimli, yatırım, işletim ve bakım maliyetleri düşük, kolay kurulum ve kullanım özelliklerine sahip, orta teknoloji biyogaz sistemlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmalarda, ülkemiz genelinde büyük bir potansiyele

sahip sığır atığı kullanılmıştır. Oluşturulan pilot ölçekli sistemlerde gerçekleştirilen denemeler sonucunda, mezofilik bölgede 1,2 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün, termofilik bölgede 2 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün olmak üzere, yüksek biyogaz üretim verimi değerlerine ulaşılmıştır. Çalışmalar kapsamında, su yer değiştirme prensibiyle çalışan, hareketli parçaları olmayan yeni bir gazometre dizayn edilmiştir. Bu gazometreyle yürütülen çalışmalarda, % 25–30 CO₂, % 98–100 H₂S giderimi gerçekleştirilmiştir. Gazometreyle ilgili çalışmalar, “TR 2006 02900 Y” no’lu faydalı model belgesi alımıyla sonuçlanmıştır. Elde edilen biyogaz, piyasada bulunan cihazlarda küçük modifikasyonlar yapılarak, pişirme, sıcak su hazırlama, ısınma ve elektrik üretimi amacıyla kullanılmıştır. Oluşturulan sistemle aynı teknik özelliklere sahip, 50 m³ kapasiteli bir biyogaz tesisi, 70 büyükbaş hayvana sahip bir çiftlikte kurulmuş ve elde edilen bulgular uygulamaya aktarılmıştır. Bu tesisten yaklaşık 60 Nm³/gün biyogaz elde edilmektedir. Tasarlanarak oluşturulan tüm tesisler, yerli sanayi tarafından imal edilebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Biyokütle, Biyogaz, Biyogaz Sistemleri, Organik Atık, Gaz Giderimi, Gazometre

ABSTRACT**DESIGN, MANUFACTURE, TRIAL RUN AND
INVESTIGATION OF PARAMETERS IMPACTING ITS
PERFORMANCE OF A BIOGAS SYSTEM FOR RURAL
USE**

ERYASAR, Ahmet

Ph.D. Thesis, Solar Energy Institute

Supervisor: Prof. Dr. Gunnur KOCAR

September, 2007, 272 pages

Biogas systems have been widely used in both developed and developing countries and proved their perfection in terms of economical and technical aspects. Although our country has a big potential in organic waste products used in biogas production, biogas systems have not been widely used in our country. Especially, in the 80s, the works of being widespread in rural areas were unsuccessful because of choices which are not suitable for our country in socio-economical and technical meanings. Also, the biogas systems couldn't presented to the technical unites and the consumers, this is the other factor which plays role in this failure.

In this thesis, it is aimed at creating the biogas systems with medium technology and with high performance and low deposit, maintaining and operating costs which are especially suitable for the rural area. In the experimental studies, it is used cattle waste which has a big potential in our country. It is reached to high biogas production capacity values of 1.2 m³-biogas/m³-reactor.day in mesophilic area and 2m³ - biogas/m³ - reactor.day in thermophilic area as results of

experiences which were created in pilot-scale systems. In addition, a new gasometer was designed which works with water-replacement principles and no moving parts. In the experimental studies which operated with this gasometer it was reached to reduction of % 25–30 CO₂, % 98–100 H₂S. The works on the gasometer were resulted with certificate of beneficial model with number of “TR 2006 02900 Y”. The produced biogas was used in cooking, water and water heating and production of electricity with small modifications on the present equipments. A biogas facility with a capacity of 50 m³ which has same technical specialities with the system created, was founded in a farm with 70 cattle and the evidences added to the work. It is got about 60 Nm³/day biogas. All foundations which were created were designed to found easily by national industry.

Keywords: Biomass, Biogas, Biogas Systems, Organic Waste, Gas Reduction, Gasometer

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince, gerek maddi, gerekse manevi, her türlü desteğini esirgemeyen, tezin her aşamasında yaptığı katkılarla beni yüreklendiren, çok değerli danışman hocam, Sayın Prof.Dr. Günnur KOÇAR’a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Değerli görüşleri ve katkılarından dolayı, tez izleme ve sınav komitesi üyeleri Prof.Dr. Arif HEPBAŞLI ve Doç.Dr. Hayati OLGUN’a, gerek deneysel, gerek teorik çalışmalarında yardımlarını gördüğüm, Yüksek Lisans Öğrencisi Şefik ARICI ve Özben KUTLU’ya, desteklerini esirgemeyen Doktora Öğrencisi Bülent İLLEEZ ve Araş. Gör. Ahmet Avni ATAYOL’a teşekkür ederim. Çalışmalar için gerekli materyali ve analizleri sağlayan Sayın Faruk GÜRBÜZ’e, sunduğu imkânlar ve anlayışı ile bana destek olan Sayın Noyan İBRİŞİM’e ve onun şahsında tüm Wilo-Ontek çalışanlarına, verdikleri teknik destek nedeniyle, Ziraat Teknisyeni Üzeyir KAYAR, Elektrik Teknisyeni Ali ARVALLI ve Makina Teknikeri Ahmet AKPINAR’a, sağladığı maddi destek nedeniyle E.Ü. Araştırma Fon Saymanlığı’na teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, çalışmalarım boyunca bana gerekli desteği sunan aileme ve özellikle doktora eğitimine başladığımda benimle olan, beni daima iyiye ve doğruya yönlendiren, hala hep yanımda hissettiğim Merhum Anne ve Baba’ma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT.....	ix
TEŞEKKÜR.....	xi
İÇİNDEKİLER	xv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxv
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Biyokütle Enerjisi	3
2.2. Anaerobik Fermentasyon ve Biyogaz Üretimi	6
2.3. Biyogazın Tarihçesi	8
2.3.1. Dünyadaki Durum	9
2.3.2. Türkiye’ deki Durum	12
2.4. Biyogaz Sistemlerinin Avantajları	14
2.5. Biyogaz Sistemlerinin Potansiyel Zararları ve Dezavantajları	17
2.6. Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller	20
2.7. Biyogazın Oluşum Aşamaları	27
2.8. Biyogaz Oluşumuna Etki Eden Faktörler	31
2.8.1. C/N oranı	31
2.8.2. Çalışma sıcaklığı etkisi	34
2.8.3. Besi ortamının Etkisi	38
2.8.4. İnhibitör ve toksik maddelerin etkisi	38

2.8.5. pH ve alkanitenin etkisi	41
2.8.6. Redoks potansiyelinin etkisi	42
2.8.7. Çürütücülerde kalkış süresinin etkisi.....	43
2.8.8. Yükleme oranının etkisi.....	43
2.8.9. Karıştırmanın etkisi	46
2.8.10. Basıncın etkisi.....	49
2.9. Biyogaz Reaktörleri	50
2.10. Biyogaz Depolama Sistemleri	53
2.11. Reaktör Isıtma Sistemleri	61
2.12. Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Sistemleri.....	65
2.13. Biyogaz Sistemlerinin Otomasyonu	70
2.14. Besleme Materyali Ön Hazırlama Prosesleri.....	71
2.15. Biyogazın Kullanım Alanları.....	72
2.16. Fermente Gübrenin Özellikleri ve Kullanım Alanları	84
2.17. Biyogazın Arıtılması- Biyometan.....	89
2.18. Biyogaz Sistemlerinde Karşılaşılan Sorunlar	98
2.19. Biyogaz Sistemlerinde Sosyo-Ekonomik Yaklaşım	103
2.20. Biyogaz Sistemlerinin Çevresel Etkileri.....	118
3. MATERYAL VE YÖNTEM	126
3.1. Materyal.....	126
3.2. Pilot ölçekli biyogaz üretimi denemeleri.....	127
3.2.1 Güneş enerjisi destekli, 0,28 m3 kapasiteli biyogaz sistemi	127
3.2.2 5 m3 kapasiteli pilot ölçekli biyogaz sistemi.....	130
3.2.3 Biyogaz üretim denemeleri.....	134

3.3 Biyogaz Depolama Tankında Gaz Arıtımıyla İlgili Denemeler	136
3.4 Reaktör Sıcaklığındaki Dalgalanmaların Önlenmesiyle İlgili Denemeler	141
3.5. Basınç Etkisi İle İlgili Denemeler	142
3.6. Biyogazın Kullanımına Yönelik Çalışmalar	145
3.7. Biyogaz Reaktörünün Isıl Analizi	147
3.8. Farklı İllere Göre Reaktör Boyutlarının Hesaplanması	152
3.9. Biyogaz Sistemlerine Ekonomik Yaklaşım	154
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	155
4.1. Pilot Ölçekli Biyogaz Üretim Denemeleri	155
4.1.1. Güneş enerjisi destekli biyogaz sisteminde gerçekleştirilen deneme	155
4.1.2. 5 m3 kapasiteli biyogaz sisteminde gerçekleştirilen deneme	169
4.2. Biyogaz Depolama Tankında Gaz Arıtımıyla İlgili Denemeler	173
4.3. Reaktör Sıcaklığındaki Dalgalanmaların Önlenmesiyle İlgili Denemeler	183
4.4. Basınç Etkisi ile İlgili Denemeler	188
4.5. Biyogazın Kullanımına Yönelik Çalışmalar	192
4.6. Optimum İzolasyon Kalınlıklarının Belirlenmesi	195
4.7. Güneş Enerjisi Sistem Büyüklüklerinin Belirlenmesi	197
4.8. Farklı İllere Göre Reaktör Boyutlarının Hesaplanması	199
4.9. Biyogaz Sistemlerine Ekonomik Yaklaşım	206
4.10. Belirsizlik Analizi	213

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	214
KAYNAKLAR DİZİNİ	220
EKLER	
EK 1. Faydalı Model Belgesi	268
EK 2. 50m3 Kapasiteli Biyogaz Tesisi	270
ÖZGEÇMİŞ	272

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Avrupa birliği ülkelerinin 2004-2005 yılı biyogaz üretim değerleri.....	11
2.2. Biyogaz üretiminin aşamaları	28
2.3. Psikrofilik, mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları	35
2.4. Karıştırma sistemleri.....	47
2.5. Sabit kubbeli biyogaz reaktörü ve gaz basınçlandırma prensibi.....	56
2.6. Hareketli kubbeli biyogaz reaktörü.....	57
2.7. Hareketli kubbeli gazometre	58
2.8. Torba tipi gazometre	58
2.9 Çift membran çatılı biyogaz reaktörü	59
2.10. Isı aktarım tiplerine göre reaktör ısıtma sistemleri	63
2.11. Sera ile entegre edilmiş biyogaz sistemi	66
2.12. Biyogaz sistemi.....	67
2.13. Güneş enerjisi destekli biyogaz sistemi	68
2.14. Güneş havuzu destekli biyogaz sistemi	69
2.15. Biyogaz içerisinde bulunan su buharının bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak kısmi basınç değişimi	73
2.16. Konvansiyonel elektrik ve ısı üretimi kojenerasyon ünitelerinin verimlerinin karşılaştırılması.....	82
2.17. Anaerobik fermentasyonda kütle denkliği.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Güneş enerjisi destekli sürekli tip biyogaz sisteminin görünümü	128
3.2. Biyogaz sisteminin şematik gösterimi	129
3.3. Polietilen reaktörün yalıtım yapılmadan ve yapıldıktan sonraki görünümü.....	130
3.4. 5m ³ hacimli fiberglass biyogaz reaktörünün şematik gösterimi.....	131
3.5. 5 m ³ kapasiteli fiberglass biyogaz reaktörü	132
3.6. Biyogaz sistemini oluşturan parçalar	133
3.7. Biyogaz depolama tankının şematik gösterimi	136
3.8. 5 m ³ kapasiteli biyogaz depolama tankının görünümü	137
3.9. Biyogaz depolama tankının sistem şeması.....	138
3.10. 0,5 m ³ hacimli biyogaz depolama tankı ve su dağıtım sistemi	141
3.11. Deney düzeneği.....	144
3.12. Biyogazın pişirmede, sıcak su üretiminde, mekân ısıtmasında ve elektrik üretiminde kullanımına yönelik çalışmalar	145
3.13. Biyogaz reaktörünün ısı kayıpları	147
3.14. Hesaplamalarda kullanılan örnek evin planı	153
4.1. Günlük biyogaz üretimi.....	157
4.2. A bölgesi için üretilen biyogazın CH ₄ ve CO ₂ oranları	158
4.3. A bölgesi için günlük üretilen metan miktar.....	159

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4. pH değişimi.....	159
4.5. Günlük biyogaz üretimi	160
4.6. Üretilen biyogaz içerisindeki CH ₄ ve CO ₂ oranları	161
4.7. Günlük CH ₄ üretim miktarı	162
4.8. Deneme süresince ortam pH'ının değişimi.....	163
4.9. Termofilik denemede günlük üretilen biyogaz miktarı	164
4.10. Termofilik denemede üretilen biyogazdaki CH ₄ ve CO ₂ oranları	165
4.11. Termofilik denemede üretilen CH ₄ miktarı	165
4.12. Termofilik fermentasyon denemesi sürecinde ortamın pH değişimi	166
4.13. Denemeler sırasında biyogaz içerisindeki H ₂ S üretiminin değişimi.....	168
4.14. Günlük olarak üretilen biyogaz miktarı	170
4.15. Reaktör ve gaz depolama tankındaki biyogazın CH ₄ ve CO ₂ oranları	172
4.16. Günlük olarak üretilen ve harcanan metan miktarı.....	172
4.17. H ₂ S üretimi	173
4.18. Reaktör ve gazometredeki CH ₄ oranları	174
4.19. Deneme süresince reaktör ve gazometre içerisindeki biyogazın H ₂ S miktarları	176
4.20. Gazometredeki suyun pH değerinin değişimi.....	177

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.21. Mezofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın CH ₄ içeriği	178
4.22. Mezofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın H ₂ S içeriği.....	179
4.23. Mezofilik sürekli beslemeli denemede, gazometredeki suyun pH değişimi.....	180
4.24. Termofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın CH ₄ içeriği	181
4.25. Termofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın H ₂ S içeriği.....	182
4.26. Termofilik sürekli beslemeli denemede, gazometredeki suyun pH değişimi.....	183
4.27. Sıcaklık kontrolünde bir termostadın kullanılması durumunda reaktör sıcaklığında meydana gelen değişimler	184
4.28. İkinci termostadın 35,5 °C'ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler	185
4.29. İkinci termostadın 36 °C'ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler.....	186
4.30. İkinci termostadın 36,5 °C'ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler	187

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.31. 1. Grup için 1A, 1B ve 1C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı	189
4.32. 2. Grup için 2A, 2B ve 2C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı	189
4.33. 3. Grup için 3A, 3B ve 3C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı	190
4.34. 1. 2. ve 3. grupların günlük metan üretim miktarı	191
4.35. 1. 2. ve 3. grupların toplam metan üretim miktarı	191
4.36. İzmir için 5 m ³ reaktörün optimum izolasyon kalınlığı	197
4.37. Yıllık olarak üretilen biyogazın reaktör ısıtmasına harcama oranı	199

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

Sayfa

2.1. Biyogazın ve diğer yakıtların bazı özellikleri	7
2.2. Çeşitli materyallerin TK, UK oranları ve biyogaz verimleri .	21
2.3. Bazı materyallerin C/N oranları	33
2.4. Bazı maddelerin anaerobik fermentasyonda toksik etkiye neden olan sınır miktarı	39
2.5. Biyogaz depolama sistemleri	54
2.6. İçerdiği H ₂ S miktarına göre biyogaza verilmesi gereken hava ve oksijen miktarları.....	95
3.1. Taze Sığır Atığının Bazı Özellikleri	126
4.1. Gaz ocağında gerçekleştirilen verim deneyinin bulguları.....	193
4.2. Denemeler sonucunda elde edilen ocak verim değerleri.....	194
4.3. Hesaplamalarda kullanılan parametreler ve değerleri.....	196
4.4. İzmir için elde edilen optimum güneş enerjisi sistemi büyüklüğü.....	198
4.5. Mezofilik bölgede (37 °C) çalışan reaktörlerin optimum izolasyon	200
4.6. Termofilik bölgede (55 °C) çalışan reaktörlerin optimum izolasyon kalınlıkları	201
4.7. Reaktörlerin boyutları ve sac kalınlıkları	202
4.8. Mezofilik bölge sıcaklığı (37 °C) için, çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılamanın minimum reaktör hacimleri ve bu ihtiyaçların karşılansından sonra artan biyogaz miktarları.....	203

ÇİZELGELER DİZİNİ (DEVAM)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. İller bazında, yıllık artan biyogazın, farklı enerji eldesi amaçlı kullanımları	204
4.10. Termofilik bölge sıcaklığı (55 °C) için, çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılayan minimum reaktör hacimleri ve bu ihtiyaçların karşılanmasından sonra artan biyogaz miktarları.....	205
4.11. Termofilik reaktörler için, iller bazında, yıllık artan biyogazın, farklı enerji eldesi amaçlı kullanımları	206
4.12. Hesaplamalarda kullanılan parametreler ve değerleri	207
4.13 Potansiyel biyogaz sistemlerinin ilçeler bazında sayıları	211
4.14 İlçeler bazında potansiyel biyogaz sistemlerinden elde edilebilecek yıllık biyogaz ve fermente gübre miktarları ve parasal getirileri.....	212

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MTEP	milyon ton eşdeğer petrol
LPG	likit petrol gazı
BTEP	bin ton eşdeğer petrol
PJ	penta Joule
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
UNICEF	United Nations Childrens Emergency Fund
MTA	Maden Tektik Arama
USD	Amerikan Doları
TK	toplam katı
UK	uçucu katı
C/N	karbon azot oranı
KOİ	kimyasal oksijen ihtiyacı
YO	yükleme oranı
HBS	hidrolik bekletme süresi
KBS	katı bekletme süresi
cmSS	santimetre su sütunu
d	boru çapı (m)
s	biyogazın bağlı yoğunluğu
L	toplam boru uzunluğu (m)
C	sürtünme katsayısı
ΔP	basınç düşümü (cmSS)
PID	oransal integral kontrol (proportional integral derivative)
STP	standart basınç ve sıcaklık
$H_{a,n}$	alt ısııl değer (MJ/m^3)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (DEVAM)

$H_{a,m}$	kütlesel alt ısı değeri (MJ/kg)
ρ	yoğunluk (kg/m ³)
p_d	düzeltilmiş basınç (mbar)
p_t	toplam basınç (mbar)
p'	kısmi basınç (mbar)
CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
DME	dimetil eter
LEL	alt patlama limiti
UEL	üst patlama limiti
NVP	yıllık kazançların net bugünkü değeri
n	servis ömrü (yıl)
i	iskonto oranı
E.C	elektriksel iletkenlik (μS/cm)
Q	debi (m ³ /h)
H	basma yüksekliği (mSS)
S	su seviyesi arasındaki fark
SFC _B	özgül yakıt ihtiyacı
V_b	hacimsel biyogaz miktarı (m ³)
Pe	jeneratörün gücü (kW)
t	jeneratörün çalıştırılma süresi (h)
n_o	ocak verimi
m_s	ısıtılan suyun miktarı (kg)
C_s	suyun özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
L_e	buharlaşmayla kaybedilen ısı enerjisi (kJ/kg)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (DEVAM)

V_B	kullanılan biyogaz miktarı (m^3)
$\square Q_w$	reaktör yüzeylerinden oluşan ısı kaybı (W)
$\square Q_b$	reaktörü terkeden biyogazla oluşan ısı kaybı (W)
$\square Q_f$	besleme materyalinin reaktör sıcaklığına getirilmesi için gerekli ısı akımı (W)
$\square Q_e$	buharlaştırma yoluyla oluşan ısı kaybı (W)
$\square Q_r$	reaksiyon sırasında gerekli ısı akımı (W)
$\square Q_t$	sistemin ısı dengesini korumak için gerekli toplam ısı ihtiyacı (W)
A	toplam reaktör yüzey alanı (m^2)
K_T	toplam ısı geçiş katsayısı ($W/m^2\text{°C}$)
ΔT	reaktör çalışma sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark (°C)
l_n	malzeme katmanlarının kalınlıkları (m)
λ_n	ısı iletim katsayısı ($W/m\text{°C}$)
$\alpha_{iç}$	besleme materyalinin ısı taşınım katsayısı ($W/m^2\text{°C}$)
m	besleme materyalinin kütleli debisi (kg/s)
C_p	özgül ısı ($J/kg\text{°C}$)
$\square Q_A$	sıcak su akümülayon tankının ısı kaybı (W)
$\square Q_G$	güneşten kazanılan net ısı akımı (W)
$\square Q_Y$	yardımcı ısıtıcının sağladığı ısı akımı (W)
N_p	yıllık enerji tasarrufu (€)
PWF	net bugünkü değer çevrim faktörü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (DEVAM)

I_y	toplam yatırım maliyeti (€)
$\alpha_{dış}$	ortamın ısı taşınım katsayısı (W/ m ² °C)
Y	toplam kullanılan izolasyon malzemesinin hacimsel miktarı (m ³)
LSD	en düşük anlamlılık farkı (least significant difference)
P	yakıtın birim enerji başına maliyeti (€/J)
C_{by}	İzolasyon malzemesinin maliyeti (€/m ³)
I_0	lk yatırım maliyeti (€)

1. GİRİŞ

Organik maddelerin anaerobik fermentasyonu sonucunda elde edilen biyogaz, özellikleri nedeniyle doğal gaza benzeyen yanıcı bir gazdır. Doğal gaz veya LPG ile çalışan tüm cihazlarda, küçük modifikasyonlar yapılarak rahatlıkla kullanılabilir. Biyogaz sistemlerinin çekiciliği, çevresel ve sağlıksal sorunlara yol açan organik atıkları girdi olarak kullanması ve bu atıkları değere çevirmesindedir. Özellikle kırsal kesimde oldukça bol bulunan hayvansal atıklar, biyogaz sistemleri için en önemli girdilerdendir. Bu atıklar ya uzun süre bekletilerek tarımsal uygulamalarda gübre olarak kullanılmakta, ya da tezek denilen forma çevrilerek verimsiz bir şekilde yakılmaktadır. Kırsal kesim biyogaz teknolojilerinin önemi burada ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler, hayvansal atıkların bekletilmeden kullanılmasına olanak tanımakta, enerji içeriği yüksek olan biyogazla birlikte, zararlı ot tohumlarının ve patojenlerin giderildiği, bitkilerin kullanımına elverişli formda yüksek azot içeriğine sahip organik gübre sağlamaktadır. Ayrıca koku ve sinek oluşumu gibi, kırsal kesim sakinleri üzerinde toplumsal baskıya neden olan sorunların, büyük oranda çözülmesine neden olmaktadır. Biyogaz sistemlerinin tüm bu avantajlarına ve ülkemizin yüksek hayvansal atık potansiyeline sahip olmasına rağmen, ülkemizde biyogaz sistemleri kullanılamamaktadır. 1957 yılında başlatılan çalışmalar, 1970’li yıllarda Topraksu ve 1980’li yıllarda Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü kapsamında yürütülmüştür. Uluslararası anlaşmalarla da desteklenen bu çalışmalar, kurumlar arası koordinasyon eksiklikleri, yanlış sistem seçimleri, farklı öncelikler v.b. sebeplerle 1987 yılında tamamen kesilmiştir. Kırsal kesim biyogaz sistemlerinin yaygınlaşamamasının en büyük nedeni, teknik, ekonomik ve sosyal yönden sürdürülebilirliği mümkün sistemlerin, son kullanıcılara sunulamamasıdır. Sürdürülebilirliğin sağlanması için, kırsal kesimin sosyo-ekonomik yapısının çözümlenmesi, teknik tercihlerin bu çözümleme doğrultusunda

yapılması gerekmektedir. Yatırım maliyetleri görece düşük, yüksek verimli, kurulumu, kullanımı ve bakımı kolay biyogaz sistemleri, ülkemiz iklim koşulları ve üretim olanakları göz önüne alınarak dizayn edilmelidir.

Bu çalışmada, öncelikle biyogaz sistemlerinin teknik ve kuramsal yapıları araştırılmış, diğer ülkelerde bu sistemlerin yaygınlaşmasına yönelik çalışmalar anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda pilot ölçekli bir sistem tasarlanmış, biyogaz üretim denemeleri gerçekleştirilmiştir. Denemeler süresince, son kullanıcıların karşılaşılabileceği sorunlar üzerinde durulmuş, elde edilen veriler ışığında sistem üzerinde değişikliklere gidilmiştir. Yapılan değişikliklerde, sistem verimi yükseltilirken, yatırım, işletim ve bakım maliyetleri düşürülmeye çalışılmıştır. Sistem parçalarının tamamının, ülkemiz sanayisi tarafından üretilebilir olmasına dikkat edilmiştir. Sistem performansı, çeşitli parametrelerin sürekli takibiyle belirlenmeye ve iyileştirilmeye çalışılmıştır. Reaktör ve gazometrenin imalatında, farklı malzemeler denenmiştir. Gazometre üzerinde çalışmalar yapılmış, bakım ve kullanım kolaylığı yönünden, hareketli parçaların olmadığı, güvenli, çalışma basıncı ayarlanabilen bir tasarım yapılarak üretilmiştir. Bu gazometreye, biyogazın arıtılmasıyla ilgili işlev eklenmiştir. Gazometreyle ilgili çalışmalar, faydalı model alımıyla sonuçlanmıştır. Biyogazın kullanımıyla ilgili olarak, pişirme, sıcak su hazırlama, ısınma ve elektrik üretimi amaçlı denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde, piyasada bulunması kolay olan LPG'li cihazlar kullanılmış, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilmiştir. Oluşturulan pilot ölçekli sistem, daha büyük boyutlarda bir çiftlikte kurularak, kullanıcılara aktarılmıştır. Çalışmaların tamamında, İzmir bölgesi özelinde, ülkemiz sosyo-ekonomik ve teknik alt yapısına en uygun biyogaz sistemlerinin oluşturulması hedef alınmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, 100 yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvansal atıklar, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren, biyolojik kökenli fosil olmayan tüm organik madde kitlesi olarak tanımlanmaktadır (Yorgun vd., 1998). Bu kaynaklardan elde edilen enerjiye biyokütle enerjisi adı verilmektedir. Biyokütlerde enerji depolanması fotosentez yoluyla olmaktadır ve verimi % 1'in altındadır (Turkenburg, 2000; McKendry, 2002a). Dünya genelinde fosil enerji tüketimi, yıllık güneşten gelen toplam ışıının % 0,01'ine denk gelmektedir (Nonhebel, 2005). Genel olarak, fotosentez yoluyla depo edilen enerji yıllık global enerji tüketiminin 10 katı civarındadır. Fakat bu enerjinin % 1,5'undan azı kullanılmaktadır (Kartha and Larson, 2000; Demirbaş, 2001).

Bitkisel bazlı biyokütle genel olarak selüloz, hemiselüloz ve lignin olmak üzere üç kimyasal yapıya sahiptir. Bu yapılar H_2 , O_2 ve C' dan oluşmaktadır. Hidrojen, sülfür ve metaller az miktarda içerilmektedir. Hayvansal kökenli biyokütle ise yağ ve protein yapılarından oluşmaktadır. Bitkisel kökenlilerden ayrı oranlarda olmak üzere bu yapılar da H_2 , O_2 ve C den oluşmaktadır. Azot, sülfür ve metaller bitkisel kökenlilere göre daha fazladır (Siemons, 2002).

Dünya genelinde yıllık oluşan biyokütlenin ağırlık olarak yaklaşık % 0,5'i insanlar için besin olarak kullanılmaktadır (Twidell and Weir, 1986). Enerji tüketimi yönünden biyokütle, dünyadaki 420 EJ olan birincil enerji ihtiyacının yaklaşık % 11-15'ini karşılamaktadır. Bu oran gelişmekte olan ülkelerde % 35-50 civarındadır (Anon., 2002b; Kartha et

al., 2005). Bu ülkelerin kırsal kesimlerinde bu oran % 90'a kadar çıkmaktadır (Demirbaş, 2004a). Gelişmiş ülkelerde ise bu oran % 3 civarındadır (Voivontas et al., 2001). Fakat Avusturya, Finlandiya, İsveç gibi biyokütle enerjisinin desteklendiği gelişmiş ülkelerde % 15-20 olabilmektedir (Karthä and Larson, 2000; Demirbaş, 2001).

Türkiye'de toplam enerji tüketiminin % 10'u biyokütle enerjisiyle karşılanmaktadır (Kaygusuz and Turker, 2002a). Bu oran 1980'de % 20 iken 1998'de % 10'a gerilemiştir. Toplam biyokütle enerjisi potansiyeli yaklaşık olarak 16–32 MTEP arasında tahmin edilmektedir. Hayvansal atıkların potansiyeli 2,3 MTEP civarındadır (Kaygusuz, 2001; Kaygusuz and Türker, 2002b; Demirbaş, 2004b). Toplam enerji tüketiminin % 37 sini kapsayan evsel tüketimde, biyokütle enerjisinin payı yaklaşık % 52'dir (Sürmen, 2003).

Biyokütlenin kullanımı geleneksel ve modern olarak ikiye ayrılmaktadır. Geleneksel kullanım konvansiyonel ormanlardan elde edilip yakacak olarak kullanılan odun, yine yakacak olarak kullanılan bitki atıkları ve tezek kullanımını kapsar ve dünya genelinde kullanımı 45 ± 10 EJ/yıl civarındadır. Modern biyokütle kaynakları ise enerji ormanları, enerji bitkileri, hayvansal ve bitkisel atıklar, endüstriyel atıklar gibi kaynakları kapsamaktadır. Modern kullanım yakıt ve elektrik eldesiyle ifade edilir. Bu şekilde kullanım ise 7–10 EJ/yıl civarındadır (Hoogwijk, 2004). Modern kullanım, toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 2-3'üne eşittir (Karthä et al., 2005).

Modern biyokütle enerjisi kaynaklarından olan enerji bitkileri, genellikle şu özellikleriyle diğerlerinden ayrılır:

- 1- Yüksek büyüme hızı,
- 2- Üretimde düşük enerji girdisi,
- 3- Düşük üretim maliyeti,
- 4- Daha az oranda kirletici içermesi,
- 5- Besin amacıyla kullanımının düşük olması (McKendry, 2002a).

Enerji tarımıyla elde edilecek potansiyel, beslenme ihtiyacını tehlikeye atmadan 800 EJ civarındadır. Teknik olarak toplam biyokütle enerjisi potansiyeli ise yıllık yaklaşık 1000 EJ'dur (Faaij et al., 2002; Hoogwijk, 2004).

Biyokütle başlıca üç ana ürüne dönüştürülür: Enerjiyle ilgili olarak ısı/güç ve taşımacılık amaçlı yakıt üretimi ile endüstriye yönelik kimyasal madde üretimi.

Biyokütle enerji dönüşümünde üç yöntem kullanılmaktadır:

- 1- Termokimyasal: Direkt yakma, gazlaştırma, piroliz ve sıvılaştırma,
- 2- Biyokimyasal: Anaerobik fermentasyon, alkol fermentasyonu,
- 3- Fizikokimyasal: Transesterifikasyon (McKendry, 2002b).

2.2 Anaerobik Fermentasyon ve Biyogaz Üretimi

Anaerobik fermentasyon, organik malzemelerin oksijensiz ortamda yaşayan bakteriler tarafından bozunmasıdır. Bu bozunma sonucunda organik gübre ve biyogaz açığa çıkmaktadır. Aerobik fermentasyonda ise oksijen bulunan ortamda yaşayan bakteriler organik malzemenin bozunmasını sağlarlar. Bu bozunma sonucunda ise başlıca karbondioksit ve kompost gübre elde edilir. Anaerobik fermentasyonda, aerobik fermentasyonun tersine, organik maddelerin mineralizasyonu çok az yeni bakteri hücresi üretimiyle mümkün olmaktadır (Langhans, 2002). Anaerobik fermentasyon sırasında uçucu katının yaklaşık olarak % 30-60 kadarı biyogaza çevrilir (Anon., 2000a). Anaerobik reaktörlerde kütle denklığıne baktığımızda, reaktör çıkışında kütle % 98-96 oranına iner. Bu kütlenin yaklaşık % 7-25'i katı, % 75-93'ü sıvı haldedir (Anon., 2000a). Bazı lifli malzemeler, inorganik malzemeler ve su ya reaktör içinde birikirler veya dönüşüme uğramadan reaktörden ayrılırlar (Leggett et al., 2002). Anaerobik fermentasyondan sonra geriye kalan atık organik gübre olarak adlandırılır ve biyogaz sistemlerinin birincil ürünü bu organik gübredir (Arnott, 1985). Aerobik sistemlerde yer ihtiyacı anaerobiklere göre beş kat daha fazladır (Klingler, 2000). Endüstriyel tesislerin arıtma sistemlerinde, bütün avantajlarına rağmen anaerobik fermentasyonun daha az tercih edilmesi, bu sistemlerin belli şartlar altında düzensizleşebilmesi ve inhibe olabilmesinden kaynaklanmaktadır (Dupla et al., 2004).

Biyogaz, % 40-70 CH_4 , % 60-30 CO_2 ve diğer gazlardan (H_2S , N_2 , H_2 , CO) oluşur (Anon., 1999b). H_2 genellikle biyogaz içerisinde % 1-2'den az bulunur. Çünkü metan bakterileri bu gazı kullanırlar. CO genellikle % 1'in altında ve 10–100 ppm arasında bulunur. N_2 genellikle % 4'ün altında bulunmaktadır ve bu değerden fazla bulunması reaktör

içerisine hava karıştığının göstergesidir. H_2S kullanılan materyale bağlı olarak 100–5000 ppm arasında bulunabilmektedir. H_2S yüksek oranda reaktif bir gaz olduğu için aktarım sırasında konsantrasyonu düşme eğilimi göstermektedir. Bu yüzden örnekleme sırasında mümkün olduğu kadar reaktöre yakın yerden örnek alınması hata payını azaltır (Stafford et al., 1981). Biyogaza ısıl değerini veren içerdği metan miktarıdır. Tüm gazlar gibi biyogazın da özellikleri sıcaklığa ve basınca, aynı zamanda nem miktarına göre değişir (Anon., 1999b). Metan ideal gaz gibi davranır. Düşük basınçlarda LPG gibi sıvılaştırılamaz. Sıvılaştırılması için 280-350 bar basınç gerekir (Jenangi, 1981). Biyogazın ve diğer sıvı-gaz yakıtların bazı özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Biyogazın ve diğer yakıtların bazı özellikleri (Mitzlaff, 1988; Werner et al., 1989).

Yakıt	Yoğunluk	Isıl Değer (kJ/kg)	Ateşleme Sıcaklığı (°C)	Hava/Yakıt Oranı (kg/kg)	Metan Sayısı
Metan	0,72 kg/Nm ³	50000	650	17,2	100
LPG	0,54 kg/l	46000	400	15,5	30
Propan	2,02 kg/Nm ³	46300	470	15,6	35
Bütan	2,70 kg/Nm ³	45600	365	15,6	10
Benzin	0,75 kg/l	43000	220	14,8	-
Motorin	0,85 kg/l	42500	220	14,5	-
Doğal Gaz	0,83 kg/Nm ³	57500	600	17	80
Biyogaz (%60 CH ₄ %40 CO ₂)	1,2 kg/Nm ³	18000	650	10,2	130
Biyogaz (%65 CH ₄ %35 CO ₂)	1,15 kg/Nm ³	21500	650	11,1	120

Anaerobik bakteriler en eski yaşam formlarındandır (Al-Azzam, 2003). Anaerobik fermentasyona, bataklıklarda, deniz suyu ve tatlı su

çökeltilerinde, çeltik tarlalarında, volkanik sıcak su kaynaklarında, derin denizlerdeki jeotermal sıcak su kaynaklarında, geniş getiren hayvanların ve termitlerin sindirim sisteminde rastlanmaktadır (Ülkü ve Taygun, 1981; Chynoweth, 1996; Seadi, 2001). Deniz suyu ve tatlı su çökeltilerinde oluşan metanın bir kısmı metan oksitleyici bakteriler tarafından oksitlenmekte, bir kısmı çökelti içinde hapsedilmekte, kalanı da atmosfere salınmaktadır (Kelly and Chynoweth, 1979). Atmosfere salınan kısım üretilen toplam metanın yaklaşık olarak % 17-49'udur (Chynoweth, 1996). Her yıl yaklaşık olarak 590-880 ton metan atmosfere bırakılmaktadır. Bu miktarın % 80-90'ı biyolojik kaynaklıdır. Kalanı fosil yakıt kökenlidir (Chynoweth and Pullammanappallil, 1996). Metan karbondioksitten 23 kez daha fazla sera etkisine yol açan bir gazdır. Bu yüzden yakılmadan atmosfere verilmemesi gerekir (Jenangi, 1981).

2.3 Biyogazın Tarihçesi

Biyogaz, Asurlular tarafından M.Ö. 1000 yıllarında kullanılmaya başlanmıştır (Mazza, 2002). M.S. 23–79 yılları arasında yaşayan Plinius, bataklıkların üzerinde titreyerek yanan alevlerden bahsetmektedir. 17. yüzyılda Jan Baptista Van Helmont organik maddelerin bozunumuyla yanıcı gazın üretildiğini belirtmiştir. 1682 yılında Robert Boyle, hayvansal ve bitkisel atıkların çürütülmesiyle gaz üretimi oluştuğunu belirtmiştir (Stafford vd., 1981). Kont Alessandro Volta 1776 yılında, bozunan organik madde miktarı ile üretilen yanıcı gaz miktarı arasındaki ilişkiyi göstermiştir. 1804–1810 yıllarında John Dalton, Sir Humphry Davy ve William Henry sığır gübresinden anaerobik fermentasyonla metan üretimini ispatlamışlardır (Verma, 2002). Avogadro CH_4 'ü 1821'de tanımlamıştır (Anon., 1999b). 1868'de Bechamp ve 1873'de Popoff, metan üretimine neden olan olguyu bakterilere bağlamışlardır (Kirtz, 2003). 1876'da Herter lağım suyundaki asetatin, eşit oranda CO_2

ve CH₄'de dönüştüğünü rapor etmiştir (Marchaim, 1992). Pasteur 1884'de, hayvan atıklarından biyogaz eldesiyle ilgili araştırmalar yapmış ve at gübresinden biyogaz elde edilerek sokak lambalarının yakılmasını önermiştir (Anon., 2000c). İlk modern biyogaz reaktörü 1859'da Bombay'da işletilmeye başlamıştır (Mazza, 2002). Biyogazın ticari değeri, 1895'de İngiltere'de foseptikten elde edilen gazın ışıklandırmada kullanılmasıyla anlaşılmıştır (Jenangi, 1981; Mazza, 2002).

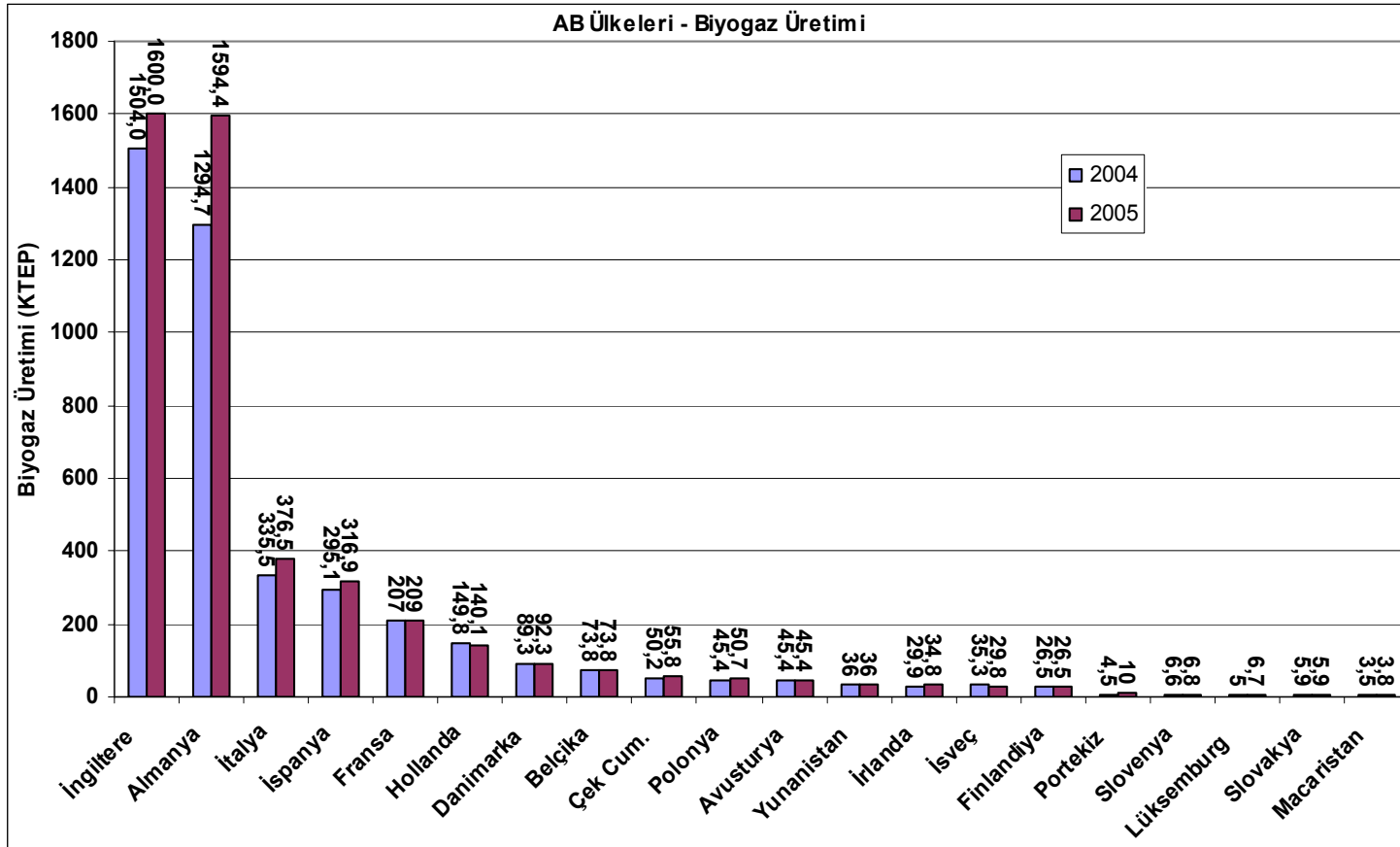
2.3.1 Dünyadaki Durum

Hindistan'da toplam nüfusun % 70'i, Çin'de ise % 80'i kırsal kesimde yaşamaktadır (Bhat vd., 2001; Singh ve Sooch, 2004; Xiaohua ve Jingfei, 2005). Buna da bağlı olarak her iki ülkede de kırsal kesim biyogaz sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Çin'de ilk biyogaz tesisi 1936'da, Hindistan'da ilk deneysel tesis 1946'da kurulmuştur. Fakat Hindistan'da bu çalışmaların başlangıcı 1939'a uzanmaktadır (Stafford vd., 1981). Biyogaz üretiminde Çin'de domuz atıkları önemli rol oynarken, kırsal kesim ailelerinin % 59-80'inin kendi sığırlarına sahip olduğu Hindistan'da, sığır atıkları ön planda tutulmuştur (Vijayalekshmy, 1985; Shailaja, 2000). Hindistan'da çiftlik tipi tesislerin kurulumu 1974 yılında başlatılmıştır (Tomar, 1995). 1981 yılında başlatılan Ulusal Biyogaz Kalkınma Programına kadar yaklaşık 80 bin biyogaz tesisi varken, 10 yıl içinde 1,67 milyon rakamına ulaşılmıştır (Ramana vd., 1994). Bu rakam 1997 yılında 2,7 milyona ulaşmıştır (Raheman, 2002). Fakat kurulu sistemlerin yaklaşık olarak 1/3'ü bakımsızlık, yetersiz atık ve atıkların ulaştırılmasındaki organizasyon eksiklikleri nedeniyle çalıştırılmamaktadır (Kartha vd., 2005). Hindistan'da aile tipi biyogaz tesislerinin potansiyeli 12 milyon olarak tahmin edilmektedir (Anon., 2002d). Çin'de çiftlik tipi reaktörlerle ilgili çalışmalar 1960'lı yıllarda yoğunlaşmış, orta ölçekli ve endüstriyel tip sistemler 70'lerin sonunda

kurulmaya başlanmıştır (Jingjing vd., 2001). Çin’de 11–13 milyon aile tipi biyogaz tesisinden yılda yaklaşık 3,3 giga-m³ biyogaz elde edilmektedir. Küçük ölçekli tesisler genellikle 8 m³ hacme sahiptir. Yaklaşık 2200 orta ve büyük ölçekli tesiste ise yılda 1,2 giga-m³ biyogaz üretilmektedir (Ping, 2001; Sun vd., 2006; Chen ve Chen, 2007). Çin’de biyogaz sistemine sahip olan ailelerin sayısı kırsal kesim nüfusunun yaklaşık % 10’una ulaşmıştır. Bazı bölgelerde bu oran % 15’e kadar yükselmektedir (Bizzo vd., 2004; Xiaohua ve Jingfei, 2005).

Avrupa Birliği ülkelerinin 2004–2005 yılı biyogaz üretim değerleri Şekil 2.1’de verilmiştir.

2005 yılı itibariyle 4715 BTEP olan toplam biyogaz üretimi, artış trendine göre 2010 yılında 8700 BTEP değerini bulacaktır. Fakat bu değer 1997 yılında yayınlanan beyaz kitapta hedeflenen 15000 BTEP değerinin oldukça altında kalmıştır (Anon., 2006). Bu ülkeler arasında en fazla üretim kapasitesine sahip olan İngiltere ve Almanya, 2000–2005 yılları arasında üretimlerini, sırasıyla 1,7 ile 3 kat artırarak toplam üretimin % 68’ini gerçekleştirmişlerdir. (Anon., 2003) Tahmin edilen potansiyel 80000 BTEP’dir (Anon., 1997b).



Şekil 2.1 Avrupa Birliği ülkelerinin 2004-2005 yılı biyogaz üretim değerleri

AB ülkelerinde, Çin ve Hindistan'ın aksine orta ve büyük ölçekli sistemler daha çok tercih edilmektedir. Özellikle Danimarka'da merkezi büyük ölçekli biyogaz tesisleri ön plandadır. 20 adet merkezi ve 35 adet orta ve büyük ölçekli çiftlik tipi sistemlerden elde edilen enerji yıllık 2,6 PJ'dur ve toplam hayvansal atıkların % 3'ü değerlendirilmektedir (Ravena ve Gregersen, 2007). Bu merkezi sistemlerin 2/3'ü termofilik, kalanı mezofilik sıcaklık bölgesinde çalıştırılmaktadır (Junginger vd., 2006). Biyogazın kullanımı da gelişmekte olan ülkelere göre farklılık göstermekte, örneğin İsveç'te üretilen toplam 5 PJ enerji eşdeğerinde biyogazın % 10'u arıtılarak otomobil, otobüs ve kamyonlarda yakıt olarak kullanılmaktadır (Börjesson ve Berglund, 2006; Lantza vd., 2007).

2.3.2 Türkiye'deki Durum

Türkiye'de biyogaz ile ilgili çalışmaları 1980 öncesi ve sonrası diye ikiye bölmek olasıdır. 80 öncesinde çalışmalar birkaç üniversite ve kamu kurumunda yetersiz teknolojik bilgiyle ayrı ayrı yürütülmüştür. İlk çalışmalar 1957 yılında Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsünde başlatılmıştır (Bilir vd., 1982). 1960'lı yıllarda biyogazla ilgili yoğun çalışmalar yapılmış ve bazı Devlet Üretim Çiftliklerinde pilot tesisler kurulmuştur (Kaygusuz ve Turker, 2002a). Tarım Bakanlığı'na bağlı Topraksu Araştırma Enstitüsü bünyesinde 1963 yılında başlatılan çalışmalarla, 5 adedi Eskişehir Topraksu Araştırma Enstitüsünde, 2 adedi Eskişehir'in köylerinde ve biri de Çorum deneme istasyonunda olmak üzere toplam sekiz adet biyogaz tesisi kurulmuştur. Çalışmalar 1969 yılına kadar sürmüştür (Soylukun ve Akdoğan, 2001). Bunların bir kısmından iyi sonuç alınmasına karşılık, yönetimlerin biyogaza sıcak bakmamaları, çalışmaları yönlendirecek ve yürütecek kurumun olmaması, teknik eleman ve çiftçilerin yeterince eğitilememeleri gibi sebeplerden tesislerin bir kısmı yarım bırakılmış ya da bir müddet

kullanıldıktan sonra istenilen verim alınamadığı gerekçesiyle terkedilmiştir (Köse, 1998). Fakat 80 sonrasında UNICEF'in teknik bilgi ve finans yönünden desteklediği, koordinasyonun DPT tarafından sağlandığı çalışmalar başlatılmıştır. Tarım ve Orman Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar bakanlığı gibi kurumlar yanında MTA, TOPRAK-SU gibi kuruluşlar da bu çalışmalara katılmışlardır. Doğu illerinden başlayarak biyogaz tesislerini kırsal kesimde yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Çalışmalar ilk olarak, Muş-Alpaslan Devlet Üretim Çiftliğinde 35 m³'lük bir tesis kurularak başlatılmıştır (Karakuşçu vd., 1981). Çeşitli Devlet Üretim Çiftliklerinde, farklı iklim koşullarında pilot tesisler kurularak, test edilmiştir. 1982 yılında konuyla ilgili sorumluluk TOPRAK-SU'ya verilmiş, devletin köylülere sağladığı 1600 USD limitli, % 16 yıllık faizli kredilerle 1000 adet 6, 8, 12 ve 50 m³ boyutlarda biyogaz sistemleri kurulmuştur. Yine 1984–1987 yılları arasında Köy Hizmetleri Eskişehir Araştırma Enstitüsünde, Ankara'da ve Erzurum'da biyogazla ilgili araştırma projeleri yürütülmüştür (Bolu, 1987). Ayrıca bu yıllarda küçük ölçekli biyogaz tesislerinin projeleri dergilerde ve kitaplarda kullanıcıya sunularak yaygınlaştırma çalışmalarına başlanmıştır (Göğüş, 1986). Kurulan sistemler bazı değişiklikler dışında Hint-Çin tipi sistemler olmuştur (Taşdemiroğlu, 1988). Bu çalışmalar da organizasyon eksiklikleri ve projeler arasında iletişim kopukluğu nedeniyle başarılı olamamıştır. Yapılan uygulamalarda verim alınamamasının en önemli sebebi olarak, reaktör sıcaklığının istenilen seviyede tutulamaması gösterilmektedir. 1980'li yıllardan sonra biyogazla ilgili çalışmalara ara verilmiştir (Köse, 1998; Kaygusuz ve Sarı, 2003).

Türkiye için biyogazın kırsal kesimde, özellikle ısıtma ve pişirme amaçlı kullanımı ekonomik görülmektedir (Taşdemiroğlu, 1991). Türkiye'de sadece hayvansal atıklardan üretilebilecek biyogaz miktarı

2,2–3,9 milyar m³ olarak tahmin edilmektedir (Demirbaş, 2004b). Yine hayvansal atıklardan sağlanabilecek biyogaz potansiyeli yaklaşık olarak 53,6 PJ enerji eşdeğeri civarındadır (Acaroglu vd., 2005).

2.4 Biyogaz Sistemlerinin Avantajları

Biyogaz sistemlerinin sağlayacağı yararlar beş kategori altında toplanabilir:

1- Enerjiyle ilgili yararlar: Yenilenebilir enerji üretimi sayesinde ticari ve ticari olmayan yakıtların yerine geçer. Ticari yakıtlarda, ülke ve birey ekonomisine finansal yararlar sağlar (Mendis ve Van Nes, 2001). Lokal enerji üretimi sonucunda enerji iletim kayıpları azalır (Anon., 1999d; Boyd, 2000; Dennis ve Burke, 2001). Anaerobik fermentasyonda, özellikle termal çevrimlerle karşılaştırıldığında, nem oranının fazla olması nedeniyle verimin düşmemesi önemli bir avantajdır. Elde edilen gaz diğer çevrim yöntemlerinde elde edilenlere göre daha az bileşene sahiptir. Bu da kullanımdan önce gazın arıtılmasının görece daha basit ve ekonomik olmasına neden olur (Chynoweth ve Jerger, 1988).

2- Gübrelemeyle ilgili yararlar: Anaerobik fermentasyondan sonra geriye kalan atık organik gübre olarak adlandırılır. Beslemede kullanılan materyalin katı maddesinin yaklaşık % 70'ini oluşturan elementler, fermentasyondan sonra miktarları ve yapıları değişmeden kalırlar. Fermente gübre içerisinde bulunan azot başlıca amonyum formundadır (Arnott, 1985). Bu form bitkilerin gelişimi açısından daha uygundur (Sasse, 1988). Çin'de yapılan çalışmalarda fermente hayvansal atıkların, fermente olmamışların kullanımına göre tarımsal verimliliği % 10–30 oranında arttırdığı rapor edilmiştir (Sasse, 1988; Marchaim, 1992).

Böylece ticari gübrenin kullanımı azalmaktadır. Ayrıca fermente atık hayvan yemi olarak kullanılabilir (Vijayalekshmy, 1985). Anaerobik fermentasyon sırasında özellikle hayvansal atıklar içerisinde bulunan zararlı ot tohumlarının giderimi sağlanır. Diğer bir avantajı organik tarımın yapılmasına imkan sağlamasıdır (Anon., 2000a). Fermente gübre ham atıktan daha sıvıdır ve uzak bölgelere pompalanması daha basit ve ekonomiktir (Klingler, 2000; Leggett vd., 2002).

3- Sağlıkla ilgili yararlar: Bacasız doğrudan yakma sistemlerinde odun ve bitkisel atıkların kullanılması, kırsal kesimde yaşayanlarda çeşitli solunum yolu hastalıklarına neden olmaktadır. Biyogazın kullanımı bu sorunları ortadan kaldırmaktadır (Ramana vd., 1994). Ayrıca atık yığınlarından oluşan sinek ve hastalıklar bu kesimde yaşayanların sağlığını tehdit etmektedir. Anaerobik fermentasyon sırasında atıklarda bulunan patojenler ve parazitlerin büyük kısmı bertaraf edilir. Patojen giderimi % 90 civarındadır (Marchaim, 1992). Böylece sağlık harcamalarında azalma meydana gelir (Anon., 1999d; Xiaohua vd., 2007). Koku, rahatsız edici özelliği dolayısıyla, hayvan üreticilerinin çevre sakinleri tarafından baskı altında tutulmasına neden olur. Kokunun kaynağı genellikle azotlu ve sülfürlü bileşenlerdir ve prosesle atıklara göre değişkenlik gösterir (Aubart ve Farinet, 1983; Wright ve Perschke, 1998; Wilkie, 2000a). Anaerobik fermentasyon yoluyla % 80-90 civarında koku giderimi sağlanmaktadır (Boyd, 2000; Anon., 2000a; Mazza, 2002). Yapılan bir çalışmada, anaerobik sabit film reaktörde üç gün bekletilen sığır gübresinde koku gideriminin % 94 olduğu, buna karşılık aynı atığın üç gün atmosfere açık depolanmasında kokunun % 77 arttığı belirtilmiştir (Wilkie, 2000b). Fermente gübre içerisinde bulunan H_2S iyonlarının miktarına göre koku oluşabilir ama göz ardı edilebilecek değerlerdedir (Anon., 1980a).

4- Kalkınmayla ilgili yararlar: Biyogaz sistemleri kırsal kesim yaşam standartlarının gelişmesini sağlar. Ayrıca yerel tesisat ve inşaat çalışanlarının gelir ve bilgilerinin artmasına neden olur. Kırsal kesimden oluşan göçü azaltır (Kishore vd., 1987). Çiftçiler üzerindeki, atıklardan ve çevre sorunlarından kaynaklanan toplumsal baskının azalmasını sağlar (Anon., 2000a). Aile içi ilişkilerin ve ortak organizasyonların güçlenmesine neden olur (Gruber ve Herz, 1996). Ticari olmayan yakıtların yerine geçerek ormanların azalmasını engellemesi, yakacak odun ve bitkisel atık toplamaya harcanan zamanın azaltılması gibi finansal olmayan faydaları söz konusudur. Bu zaman azalması, biyogaz sistemi için su temini ve gübre-su karışımının hazırlanarak reaktöre beslenmesi için gerekli süre çıkarıldığında günde yaklaşık 3 saati bulmaktadır (Mendis ve Van Nes, 2001).

5- Ekonomik yararlar: Biyogaz sistemleri, kurulduğu bölgelerde tasarrufların ve gelirin artışına neden olur (Gustavsson, 2000; Boyd, 2000). Lokal enerji ve gübre üretimi sayesinde, genel ekonomik dalgalanmalardan etkilenimi azaltır. Makro seviyede enerji ve gübrede dışa bağımlılığı azaltır (Arnott, 1985). Fermente atık daha kolay taşınır ve iletilmesinde daha küçük makinalara ihtiyaç gösterir. Böylece atık gideriminde ekonomi sağlar (Werner vd., 1989; Tafdrup, 1995; Anon., 2000a). Samanların ve bitkisel atıkların yakılmasını azaltarak, hayvanların beslenmesinde iyileşme sağlar (Marchaim, 1992).

6- Çevresel yararlar: CO₂'den 23 kez daha fazla sera gazı etkisine sahip metan ve 310 kez daha etkili olan N₂O (nitroz oksit) emisyonu ile amonyak emisyonu özellikle hayvansal atıkların depolanması sırasında oluşur. Ayrıca yüksek derecede sentetik azot gübrelemesi sonucunda N₂O oluşur (Gielen vd., 1998). Tam olarak ispatlanmamakla birlikte fermente gübre ham gübreden daha az N₂O emisyonuna neden olur.

Sentetik gübrelerin yerine kullanılması bu emisyonu düşürür. Çünkü kullanılan her ton sentetik gübreden oluşan N_2O emisyonu 0,0297 tondur. Sağlıksal, çevresel ve koku problemi yaratan amonyak emisyonu da anaerobik prosesler sayesinde azalır. Ayrıca bu atıkların doğrudan kullanımı toprakta ve yeraltı sularında nitrat kirlenmesine yol açar. Domuz atıkları yüksek oranda bakır ve çinko gibi ağır metaller içerir ve kirliliğe yol açar. Bu atıklar sinek ve koku oluşumuna neden olur (Boyd, 2000). Biyogaz sistemleri, çevre kirliliğinin büyük ölçüde azalmasını sağlar (Dennis ve Burke, 2001). Biyogaz sistemlerinde organik katı maddenin yaklaşık % 50'si giderilmektedir. Bu oran bazı sistemlerde % 80-90'a kadar çıkabilmektedir (Brown, 1994). Sera gazı emisyonu ile arıtılmış atıkta toplam oksijen ihtiyacının düşürülmesi sağlanmaktadır (Nelson ve Lamb, 2002). Biyogaz sistemleri sayesinde, çeşitli mikropların ve zararlıların üremesi için ortam hazırlayan atıklar, değerlendirilerek bertaraf edilmiş olur (Arnott, 1985).

2.5 Biyogaz Sistemlerinin Potansiyel Zararları ve Dezavantajları

Biyogaz sistemlerinin potansiyel zararları ve dezavantajları, çevresel, sağlıkla ilgili ve sosyo-ekonomik olmak üzere üç başlık altında toplanabilmektedir. Kurulum ve işletim aşamasında alınacak basit önlemlerle engellenebilecek olan bu zarar ve dezavantajlar şunlardır:

1- Çevre açısından potansiyel zararlar: Besleme materyalindeki azot, amonyumun organik formuna dönüşmektedir. Amonyum, amonyak veya nitrata dönüşmektedir. Eğer fermente gübrenin saklama koşulları uygun olmazsa, azot ve amonyak emisyonu söz konusu olur. Amonyak fermente gübrenin yüzeysel uygulamalarında da kaybedilebilmektedir. En doğru kullanım şekli, fermente gübrenin toprağın altına enjekte

edilmesidir. Nitrat ise toprak altına süzülerek, yeraltı sularının kirlenmesine neden olabilir. Biyogaz sistemlerinde genellikle yüksek oranda su kullanılmaktadır ve fermente gübrenin depolanmasında fazlalık olan suyun deşarj edilmesi sırasında da bu durumla karşılaşlabilmektedir. Yine de mineral ve kompost gübrelere göre nitrat kirlenmesi yaklaşık % 10-20 daha azdır (Easterly ve Lowenstein, 1986; Dalemo vd., 1998; Leggett vd., 2002). Biyogazın yakılması sırasında, kömüre göre çok daha az olmakla birlikte SO_2 ve NO_x emisyonu oluşabilmektedir. Bu özellikle içten yanmalı motorlarda ve yakıt/hava oranı düşük olduğunda söz konusudur (Nelson ve Lamb, 2002; Krich vd., 2005;). Sistemde kaçak olması durumunda, atmosfere biyogazın yakılmadan verilmesi olasıdır. Bu durumda sadece enerji kaybı değil, CH_4 ve CO_2 gibi sera gazları emisyonunun da artması söz konusudur (Cumby vd., 2000). Biyogaz emisyonu, sisteme bağlı olarak toplam biyogaz üretiminin % 5–20 oranında fermente gübrenin depolanması sırasında da oluşur. Biyogazın arıtılması ve sıkıştırılması sırasında ise yine sisteme bağlı olarak % 0,2 ile % 11–13 arasında değişen kayıp söz konusu olabilmektedir. Eğer üretim sırasındaki biyogaz kaybı % 2 alınırsa, toplam yakıt çevrimi sırasında oluşan CH_4 emisyonu 10–100 kez, % 15 alınırsa 100–1000 kez artar (Börjesson ve Berglund, 2006). Biyogaz sistemleri yerel taşımacılığın artmasına böylece de trafiğin yoğunlaşmasına neden olur. Özellikle jeneratör, pompa ve kompresörlerin kullanıldığı biyogaz tesisleri çevrede gürültü kirliliği yaratabilir (Anon., 2000a; Monnet, 2003). Kötü dizayn edilmiş büyük sistemler görsel kirliliğe neden olabilirler (Anon., 1997; Anon., 2000a; Monnet, 2003). Ayrıca biyogaz sistemlerinde atığın hacmi azalmaz, su ekleniyorsa çoğalması söz konusudur (Anon., 1999f; Leggett vd., 2002).

2-Sağlıkla ilgili potansiyel zararlar: Atıklardan kaynaklanan sağlık problemleri, biyogazın zehirlenme, patlama ve yangın riski söz konusudur (Anon., 2000a; Seadi, 2001; Nelson ve Lamb, 2002; Monnet, 2003;). Patojenler ve parazitler, mezofilik ve termofilik reaktörlerde tamamen giderilemezler. Giderim için, enerji gerektiren pastörizasyon işlemine ihtiyaç duyulur. Patojen içeriği yönünden yüksek risk taşıyan atıkların kullanıldığı biyogaz tesislerinde, giderim amacıyla genellikle termofilik sistemler için 70 °C de 0,5 saat, mezofilik sistemler için ise 1 saat ek bekletme uygulanmaktadır (Colleran, 2000). Merkezi sistemlerde, atık toplama sırasında hayvanlara hastalıkların bulaşma riski vardır (Anon., 2000a; Monnet, 2003). Özellikle belediye atıklarının kullanıldığı tesislerde, tesis çalışanlarına havada bulunan bakteriler nedeniyle sindirim sistemiyle ilgili hastalıklar bulaşabilmektedir (Ivens vd., 1997). Biyogaz içerisinde de çeşitli patojenler taşınabilmektedir. Bu yüzden, oldukça düşük oranda olmasına rağmen, öncelikle pişirme amaçlı olmak üzere biyogaz kullanımında, yanmamış biyogazla temas risk taşımaktadır (Vinnerås vd., 2006).

3-Sosyo-Ekonomik dezavantajlar: Biyogaz tesislerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir. İşletilmesinde özen ve teknik bilgi gereklidir. Periyodik bakım zorunludur (Leggett vd., 2002). Bu yüzden özellikle kırsal kesimde kurulacak biyogaz tesisleri çiftlik sahiplerine ekonomik yük getirmekte ve yaşam tarzlarının değişmesini gerektirmektedir. Ayrıca tesisler, kullanıcıların ellerinde bulunan hayvan sayısının sabit olduğu varsayımı üzerine kurulmaktadır. Fakat atık miktarında düşüş olursa, başka atıkların kullanılmasıyla bu problem çözülebilmektedir (Vijayalekshmy, 1985). Biyogaz uygulamaları, çiftçiler arasında varolan dengesiz gelir dağılımının kuvvetlenmesine neden olabilir. Sistem kurmaya gücü yetmeyen aileler, ellerinde kullanabilecekleri atığı daha güçlü çiftçilere satmak zorunda kalabilirler (Anon., 1999d). Bu durumu

göz önüne alan bazı araştırmacılar, gelir düzeyi yüksek olan kesim tarafından kullanılabilen hayvansal atıklar yerine, serbestçe ulaşılabilecek bitkisel atıkları biyogaz üretiminde önermiş ve bu konuda çalışmalar yapmışlardır (Patrabansh ve Madan, 2000). Anaerobik fermentasyonda çevrim verimi ve gaz oluşum hızı düşüktür. Bu nedenle biyolojik ve termal dönüşüm yöntemlerinin hibrit olarak kullanıldığı sistemler üzerinde denemeler yapılmış ve toplam sistem veriminin yükseldiği tespit edilmiştir (Chynoweth vd., 1980; Butner vd., 1988).

2.6 Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller

Tarımsal, toplumsal ve endüstriyel atık/atıksular gibi çok çeşitli kaynaklar biyogaz sistemlerinde besleme materyali olarak kullanılabilir. Enerji bitkileri, algler, kültür bitkilerinin hasat sonrası atıklar aynı hayvansal atıklar gibi biyogaz üretiminde kullanılabilir. Kentsel atık ve atıksular, özellikle gıda endüstrisine ait atıklar diğer önemli kaynaklardır. Belediyelere ait atık su arıtımında anaerobik fermentasyonun kullanımı diğer uygulamalara göre daha kompleks bir yapıya sahiptir. Çünkü bu atıklar toksik maddeler ve ağır metaller içermektedir (Arnott, 1985). Fakat hayvansal atıklar anaerobik fermentasyona daha uygundur (Steffen vd., 1998; Boyd, 2000). Avrupada çalışan biyogaz sistemlerinin % 89'u bu kaynağı kullanmaktadır (Boyd, 2000). Hayvansal atıklarda atık miktarları, hayvanların beslenme rejimine, büyüklüklerine ve iklim şartlarına göre değişkenlik gösterir. Ayrıca yetiştirme şekline göre elde edilebilen atık miktarı değişmektedir (Vijayalekshmy, 1985). Eğer hayvanlar sadece gece bağlı tutuluyorlarsa, elde edilen atık toplam atığın % 50'si olarak hesaplanmalıdır. Tabanı toprak bir ağılda tutulduklarında, atığı toplamak zorlaşmakta ve reaktör içerisine kum ve taş gibi uygun olmayan materyallerin girmesini engellemek imkansız hale gelmektedir. Ayrıca

idrar tamamen kaybedilmektedir. Eğer altlık kullanılıyorsa, saman en fazla 2-3 cm boyunda olmalı, fermente olmayan talaş kullanılmamalıdır (Werner vd., 1989). Serbest olarak tutulan hayvanlar, yazın otlağa çıkarıldığında toplanan atık ve dolayısıyla biyogaz üretimi yaz aylarında düşmektedir (Anon., 2001d). Çeşitli materyallerin TK ve UK oranlarıyla biyogaz verimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli materyallerin TK, UK oranları ve biyogaz verimleri (Pound vd., 1981; Werner vd., 1989; Koç vd., 1990; Steffen vd., 1998; Srinivasan, 1999; Anon., 1999c; Anon., 2000a; Seadi, 2001; Anon., 2002a; Omer ve Fadalla, 2003; Köttner, 2003)

Materyal	TK (%)	UK (%)	Biyogaz Verimi (l/kg.UK)
Sığır Atığı	5-25	75-85	200-350
Tavuk Atığı (Yumurta)	10-35	70-75	310-620
Tavuk Atığı (Et)	50-90	60-80	550-650
Küçükbaş Hayvan Atığı	30	20	90-310
At Atığı	25-30	60	200-350
Domuz Atığı	3-16	70-80	250-550
Buğday Samanı	70-90	85-93	200-300
Mısır Artığı	80	91	350-480
Pirinç Artığı	89	93	170-280
Cimen	20-25	89-90	280-550
Küspe	65	78	140-190
Sebze Atıkları	5-20	75-86	300-400
İnsan Atığı	20-27	75	310-400
Yapraklar	80	90	300-400
Süt Prosesi Atığı	8-12	90	350-800
Konsantre Süt Prosesi Atığı	20-25	90	800-950
Meyve Artıkları	15-20	75	250-500
Yemek Atıkları	10-18	80-95	500-600

Sığır atığında biyogaz verimi ortalama 0,2 m³/kg-UK iken domuz atığında bu değer yaklaşık 0,3–0,45 m³/kg-UK’dır. Bu fark domuz

atığında, toplam katıda yağ oranının % 7–12,3 sığır atığında % 3,5–7,5 civarında olmasından kaynaklanmaktadır (Boyd, 2000). Sığır atığındaki sorun, metanın bir kısmının hayvanın sindirim sistemi içerisinde dönüştürülmesi ve kg atık başına biyogaz eldesinin düşmesidir. Sığır atığı gibi geviş getiren hayvanların atıkları sindirim sistemindeki metan bakterileri tarafından dönüştürülemeyen maddeleri içerir. Bu nedenle biyogaz verimleri görece daha düşük olmaktadır (Karve vd., 2005). Koyun gibi geviş getirmeyen hayvanların atığından daha fazla biyogaz elde edilebilmektedir (Jain vd., 1981; Anon., 1999c; Gustavsson, 2000). Geviş getiren hayvanların atığı, tavuk ve domuz atığından farklı olarak kuruduktan sonra su absorblamaya izin vermez ve yüzeyde yüzer. Parçalamak dahi bu duruma engel olmaz (Arnott, 1985; Werner vd., 1989). Sığır atığında, hayvanın sindirim sisteminden gelen metan bakterileri bulunduğu için, biyogaz üretiminde doğal aşı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Reddy ve Rao, 1996). Fakat saman, yaprak, tarımsal atıklar, endüstriyel atıklar fermente olabilmelerine rağmen aşılama yapılmadığında fermentasyonun başlaması aylarca sürebilir (Stafford vd., 1981). İçerdiği yüksek miktardaki fibre ve bu materyalin fermentasyonunun zor olması, sığır atığının dezavantajıdır (Langhans, 2002). Hayvanların beslenmesi, atık içerisindeki kompozisyonu değiştirdiği için verimde önemli rol oynar (Santana ve Pound, 1980). Beslenme rejiminde tahıl ürünleri yoğun olarak kullanılan sığırların atıklarının fermentasyonunda, % 50 UK giderimi sağlanabilirken, yoğun selülozik yemlerin kullanıldığı durumlarda UK giderimi % 30'a kadar gerileyebilmektedir (Stafford vd., 1981). Sığır için günlük elde edilen atık miktarı, cinsine, ağırlığına ve barınma şekline göre 8–40 kg arasında değişmektedir. Eğer sığırlar sadece geceleri sabit tutuluyorsa elde edilen atık toplamın 1/2 – 1/3'ü arasındadır. Yataklık kullanılıyorsa, toplanan atıklarda bulunan yatak malzemesi hayvan başına 2-3 kg civarındadır (Werner vd., 1989).

Tavuk atığı yumurta ve et tavukçuluğuna bağlı olarak değişik karakterdedir. Yumurta tavukçuluğunda atık sürekli alınmakta ve kullanılabilir. Et tavukçuluğunda ise tavuklar kesime götürüleceği zaman barınak temizlenmekte, atığın katı madde oranı yüksek olmaktadır. Bu yüzden biyogaz üretimine daha az uygundur (Werner vd., 1989). Tavuk atıklarında kullanılan altlığa bağlı olarak lignin oranı yüksek olabilir ve degradasyon verimleri düşer (Stafford vd., 1981).

Katı organik atıklar dendiğinde nem oranı % 85-90'nın altında olan atıklar anlaşılmalıdır (Mata-Alvarez vd., 2000). Domuz atıklarının, barındırma çeşitlerine bağlı olarak katı madde miktarı % 2-10 arasında değişir. Suyla yıkanarak toplanan domuz atığının TK oranı % 2-5 arasındadır ve biyogaz üretimi ekonomik olmamaktadır. Fakat sıyırmayla toplanan domuz atığında bu oran % 5-10 olmaktadır. Sığır atığında da TK oranları % 10-12 arasındadır. Fakat hayvanların otlaklarda tutulması kullanılabilir atık miktarını düşürmektedir. Tavuk atıklarında TK oranı % 20'nin üzerindedir. Ayrıca amonyak miktarıda fazladır ve toksik etkiye neden olabilir. Açık alanda toplanan tavuk atığının yüksek oranda kum içermesi, reaktör içerisinde çökme nedeniyle operasyonel aksaklıklara neden olmaktadır. Küçük çiftliklerde toplanan sığır atıkları, % 10-30 arasında TK içermektedir. Bunun nedeni çoğunlukla altlık olarak kullanılan saman ve talaştır. Bu da köpük problemine ve fermentasyon süresinin uzamasına neden olmaktadır (Steffen vd., 1998). Hayvansal atıklarda atık potansiyelini belirlemede genellikle hayvan birimi kullanılmaktadır. 500 kg olan hayvan birimi sığır için 1, domuz için 6, tavuk için yaklaşık 250 adet hayvana eşittir (Steffen vd., 1998).

Hasat ve bahçe artıkları genellikle hayvan atıklarıyla birlikte biyogaz üretiminde kullanılmaktadır (Werner vd., 1989). Yapraklar, mısır atıkları, yonca, sap-saman gibi bitki artıkları, bozulmuş veya düşük

kaliteli meyveler ve sebzeler bunlara örnek teşkil etmektedir. Enerji bitkileri de bu amaçla kullanılabilir (Steffen vd., 1998). Enerji bitkilerinden biyogaz üretimi gittikçe önemli hale gelmektedir. Bu bitkiler arasında mısır, ayçiçeği ve çeşitli otlar ön plana çıkmaktadır. Şeker pancarı atıkları da kullanılmaktadır. Selülozun geviş getiren hayvanların sindirim sisteminde fermentasyon oranı % 40–59 iken, biyogaz sistemlerinde % 80'e kadar çıkabilmektedir. Özellikle enerji bitkilerinin hayvansal atıklarla birlikte fermentasyonu daha çok uygulanmaktadır (Umetsu vd., 2006; Amon vd., 2007a; Amon vd., 2007b). Almanya'da bulunan biyogaz reaktörlerinin yaklaşık % 90'ında enerji bitkileri ek besleme materyali olarak kullanılarak, biyogaz verimleri artırılmaktadır (Bohn vd., 2007). Bitki yapısında bulunan lignin, selülozu bakteriden koruduğu için, fermentasyon istenilen ölçüde gerçekleşemez. Selülozun ligninle bir araya geldiği lignoselülozik yapıda, erimez durumda olan lignin, selüloz matriksinin boşluklarını doldurarak büyük selüloz enzimlerinin içeriye işlemelerini durdurmaktadır. Lignin oranının her % 1'lik artışı, uçucu katı gideriminde % 3'lük bir düşüşe neden olmaktadır. Bu sorun lignin ve selüloz arasındaki hücre bağlarını gevşetmekle ortadan kaldırılabilir. Lignoselülozik bileşenlerin ayrışabilirliğini artırmak için, kimyasal ve/veya fiziksel ön-işlemler gerekmektedir (Stuckey, 1981; Tosun vd., 1986; Sharma vd., 1988). Bu yüzden özellikle odunsu atıkların anaerobik fermentasyonunda ön hazırlama işlemleri büyük önem taşımaktadır (Jerger vd., 1982). Bitkisel atıkların reaktöre beslenmeden önce 30 °C ve yukarıdaki hava sıcaklığında 7–10 gün civarında, 20 °C'nin altındaki hava sıcaklıklarında 15 gün civarında kompostlanması, metan bakterilerinin oluşumuna neden olarak fermentasyonun hızlanmasını sağlar. Bu sürelerden az ya da daha fazla süren kompostlama biyogaz üretimini azaltır. Bu kompostlama sırasında kireç veya enzimlerin kullanılması lignoselülozik yapının bozulmasını ve dolayısıyla anaerobik

fermentasyonun hızlanmasını sağlar. Kompostlama sırasında yaklaşık 60/1 – 100/1 civarında olan C/N oranı 1 hafta içinde 16/1–20/1 oranlarına kadar gerileyerek anaerobik fermentasyon için uygun koşullara iner (Arnott, 1985). Bitkisel atıkların sürekli sistemlerde kullanılabilmesi için gerekli olan ön hazırlama prosesleri, güç tüketimleri ve maliyetleri nedeniyle kırsal kesim için uygun görülmemektedir (Chanakya vd., 1995). Bitkisel atıklar genellikle hasat zamanı, tarla temizleme zamanı gibi özel dönemlerde büyük miktarlarda toplanır. Ayrıca sürekli beslemede ön işlemden geçirilmeleri ve reaktöre beslenmeleri zorluklar içerir. Bu nedenle kesikli tip reaktörler bu atıklar için daha uygun olmaktadır (Vijayalekshmy, 1985; Lichtman vd., 1996;). Ayrıca yarı sürekli, sıvı fazın sirküle edildiği reaktörler de bu tip atıkların anaerobik fermentasyonunda önerilmektedir (Chanakya vd., 1995). Termofilik bölgede çalışmak, lignoselülozik materyallerde verimi artırmak için diğer bir seçenektir (Kivaisi ve Mtila, 1998). Ancak lignin oranı yüksek olan materyallerde termokimyasal dönüşüm yöntemlerini kullanmak daha verimli olmaktadır (Anon., 1980b).

En fazla biyogaz/metan üretilen maddeler sırasıyla organik yağlar, proteinler ve karbonhidratlardır. Proteinler ve yağlar yüksek metan oranına neden olurken, şekerler gibi oksitlenen bileşiklerin fermentasyonu sonucunda düşük metan oranı elde edilir (Chynoweth, 1987). Fermentasyon sırasında karbonhidratlar yaklaşık olarak % 13, proteinler % 36 ve yağlar % 76 civarında değişime uğrarlar (Chynoweth ve Mah, 1971; Stafford vd., 1981). Proteinler ve yağlar, karbonhidrata göre daha uzun zamanda fermente olurlar (Klein, 2002). Selülozun fermentasyon süresi birkaç hafta civarındadır. Hemiselüloz, yağ ve protein birkaç gün, şeker, uçucu yağ asitleri ve alkol birkaç saatte fermente olurlar (Steffen vd., 1998). Biyogaz verimini artırmak için besleme materyaline farklı maddeler konabilmektedir. Sığır gübresine

odun kömürü karıştırıldığında, verimin % 17 arttığı belirtilmiştir. Aynı şekilde bakteriyel aktivasyonu hızlandırıcı, bitkilerden elde edilen, sabunlaştırıcı steroid maddeler de biyogaz verimini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Singh vd., 2001). Protein yoğun materyallerin anaerobik fermentasyonunda % 6'yı aşmamak koşuluyla gliserin eklenmesi biyogaz üretimini artırmaktadır (Amon vd., 2006b). Ayrıca yağ içeriği yüksek olan domuz atığı gibi hammaddelerle çalışıldığında besleme materyaline 3 g/l'ye kadar kalsiyum eklenmesinin biyogaz üretimini artırdığı, fakat 5-7 gr/l gibi yüksek oranlarda sistemin inhibe olmasına neden olduğu bildirilmiştir (Ahn vd., 2006).

Biyogaz sistemlerinde verimlilik dört yaklaşımla hesaplanır. Birinci yaklaşımda reaktör hacmi başına elde edilen günlük biyogaz miktarı göz önüne alınır. İkincide elde edilen biyogazın içerisinde bulunan metan miktarı önem taşımaktadır. Üçüncü olarak besleme materyalinin kg-UK veya kg-KOI başına ne kadar m³ biyogaz elde edildiğine bakılmaktadır. Son olarak ise beslenen materyalin giderilen kg-UK veya kg-KOI'si baz alınan kriterlerdendir. Tek kademeli, karıştırmalı, sürekli tip sistemlerde ve hayvansal atıkların kullanılması durumunda verim değeri 1,5 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün'e, gaz üretimi 0,45 m³/kg-UK'ye, UK giderim oranı 0,54 kg-UK/kg-UK'ya çıkabilmektedir. En verimli çalışan anaerobik reaktörden, 2,5 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün yani 1,75 m³-metan/m³-reaktör.gün elde edilebilir (Demuynck vd., 1984). Fakat genelde ortalama reaktör verimi hayvansal atıklarda 1,1 – 1,3 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün olmaktadır (Ghaly ve Singh, 1984). Bu tip sistemlerde kullanılan organik maddenin bileşimine bağlı olarak 1 g organik maddeden yaklaşık 0,5–0,7 lt metan elde edilebilir (Ülkü ve Taygun, 1981). Avrupa Birliği ülkelerinde reaktörlerin verimleri 1 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün'den 3 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün'e yükselmiştir. Bazı uygulamalarda bu oran 5

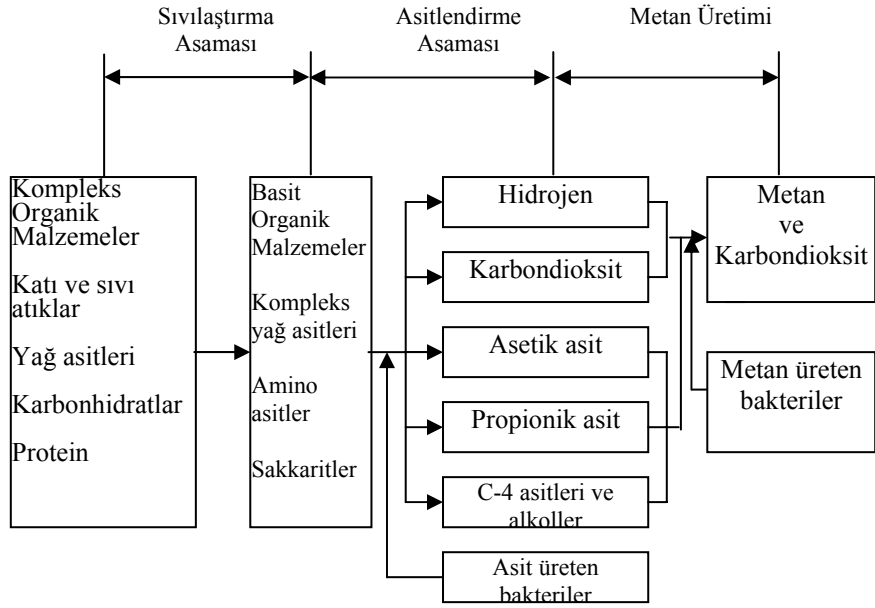
m^3 -biyogaz/ m^3 -reaktör.gün'e kadar yükselmektedir. Fakat bu değerler, katı bekletme süreleri hidrolik bekletme sürelerinden farklı olan yüksek hızlı reaktörlerde gerçekleşmektedir (Pauss ve Nyns, 1993). Bu yüzden verim değerlerinin sistem performansının değerlendirilmesinde kullanılabilmesi için bekletme sürelerinin bilinmesi gerekmektedir (Stafford vd., 1981). Hint-Çin tipi reaktörlerde genellikle verim değerleri 0,3-0,5 m^3 -biyogaz/ m^3 -reaktör.gün olmaktadır (Göğüş, 1986; Marchaim, 1992; Chanakya vd., 1999; Hammad vd., 1999). Uygulamada genellikle karşılaşılan % 50 UK giderimidir. Bu oran farklı yükleme hızları ve sıcaklıklarda % 30–64 arasında değişebilmektedir (Dennis ve Burke, 2001).

2.7 Biyogazın Oluşum Aşamaları

Anaerobik fermentasyon çeşitli anaerobik bakterilerin etkinlikleri sonucu meydana gelir. Bu bakteriler, hidrolitik bakteriler, hidrojen üreten asit bakterileri, homoasetojenik bakteriler ve metan oluşturan bakterilerdir (Dönmez, 1981; Stafford vd., 1981; Vijayalekshmy, 1985; Marchaim, 1992; Rozdilsky, 1997). Anaerobik fermentasyon sonucu biyogaz üretimi üç aşamada gerçekleşmektedir (Anon., 1999b):

- 1- Sıvılaştırma aşaması,
- 2- Asitlendirme aşaması,
- 3- Metan üretimi.

Bu aşamalar ve aşamalarda oluşan ürünler şematik olarak Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 Biyogaz üretiminin aşamaları (Maekawa, 1999).

Havasız ortamda anaerobik fermentasyona uğrayan karbonhidrat, protein ve yağlardan oluşan organik maddeler, asit oluşturan bakterilerin hücre dışına salgıladıkları lipaz, amilaz, proteaz, selülaz gibi hücre dışı enzimlerle hidrolize uğrarlar (Eraslan, 1981). Bu aşamada selüloz şekerlere veya alkollere, proteinler peptidlere veya amino asitlere dönüşürler (Anon., 1999b; Verma, 2002). Bu hidroliz sonucunda küçük moleküllü şekerler, amino asitler ve yağ asitleri ile gliserin meydana gelir. Hidroliz ürünleri suda çözünmediği için bu aşamaya sıvılaştırma (likifikasyon) aşaması adı verilir. Organik karbonun çözünür olmadığı atıklarda sıvılaştırma aşaması, hızı sınırlayıcı rol oynar (Stuckey, 1981; Boone et al., 1993; Gustavsson, 2000; Johannes, 2002).

Daha sonra ortamda çözünen bu organik maddeler (özellikle şekerler ve amino asitler) bakteriler tarafından kullanılır. Bu sırada uzun zincirli yağ asitleri daha küçük molekülü yağ asitlerine dönüşürler. Oluşan piruvat, alkollere (metanol, etanol, bütanol) ve organik asitlere (asetat, laktat, propiyonat, bütirat) dönüştürülür (Eraslan, 1981). Bu aşamaya asitlendirme (asidifikasyon) aşaması denilir. Anaerobik proseslerin başlangıcında, besleme materyaliyle gelen az miktarda oksijen bulunur. Asitlendirme aşamasında, asetik asit üretiminde bakterilerin karbona ve oksijene ihtiyacı vardır. Çözünmüş oksijeni veya çevredeki oksijeni kullanırlar. Böylece metan bakterileri için önemli olan anaerobik ortamın oluşmasını sağlarlar (Anon., 1999b). Bu aşamada oluşan formik asidin büyük bir kısmı dönüşüme uğrayarak ortama hidrojen ve karbondioksit gazı verir. Ayrıca H_2S bu aşamada oluşur (Eraslan, 1981).

Daha sonra metan oluşturan bakteriler tarafından CH_4 ve CO_2 üretilmektedir. Metan bakterileri farklı iki grup mikroorganizmadan oluşur (Demuynck et al., 1984):

- 1- Metan ve bikarbonat oluşturmak için asetatı kullananlar,
- 2- Metan oluşturmak için moleküler hidrojen kullananlar.

Spor oluşturmayan *Methanobacterium*, spor oluşturan çubuk biçiminde *Methanobacillus*, sferik (küresel) biçimde olan *Methanococcus* ve *Methanosarcina*, spiral çubuk şeklinde olan *Methanospirillum* bu güne kadar tespit edilen metan bakterisi familyalarıdır (Vijayalekshmy, 1985). Metan oluşumu iki yolla meydana gelir. Ortamda oluşan etanol gibi alkoller ya da hidrojen molekülü reaksiyonlarla CO_2 'yi indirgeyerek metan oluşturur. Ortamda oluşan propiyonik asit, asetik asit ya da

CO₂'nin indirgenmesi ile metan meydana gelir. Asetik asidin metan ve CO₂'ye ayrışması metan bakterilerinin en çok oluşturduğu temel reaksiyonlardan biridir. Bu olaylar şu şekilde özetlenebilir (Pekin, 1983; Koç vd., 1990; Boyd, 2000; Johannes, 2002):

Organik mad. + Besinler Bakteriler> Hücreler + Uçucu asitler + Alkoller + H₂ + CO₂

Uçucu asitler + Alkoller + H₂ + CO₂ + Besinler Metan bakterileri> Hücreler + CH₄ + CO₂

Oluşan metanın yaklaşık % 70'i asetattan, kalanı hidrojenden üretilir (Chynoweth ve Mah, 1977; Jenangi, 1981; Marchaim, 1992;). Asetat üretimi, metan üretiminde kilit rol oynar (Schmidt vd., 2000). Asetatın metana dönüştürülmesi aşaması da fermentasyon hızını kısıtlayıcı role sahiptir (Punal vd., 2003; Zuru vd., 2004). Metan aşamasının kısıtlayıcı olmasının nedeni metan bakterilerinin düşük gelişme hızlarıdır (Siegert ve Banks, 2005).

Anaerobik fermentasyonda çeşitli bakterilerin birlikte çalışması söz konusudur. Asit bakterileri metan bakterileri için oksijensiz ortam ve besin sağlarken, metan bakterileri de asit bakterilerinin ürünlerini dönüştürerek toksik etkisini engellerler (Anon., 2000c). Metan bakterileri oksijene karşı çok hassastır. 0,01-0,08 mg/lit çözünmüş oksijen onların büyümesini engeller (Kishore vd., 1987). Asit bakterileri, metan bakterilerine göre sıcaklık dalgalanmalarına karşı dirençlidir. Etkinliklerini sürdürebildikleri pH aralığı asit bakterilerinde daha geniştir ve oksjenden etkilenmezler. Organik bileşenlerin çoğunu besin olarak kullanabilirler. Metan bakterileri besin olarak sadece basit organik asitleri kullanırlar (Leggett vd., 2002). Fermentasyonun performansını yüksek

tutmak için bu iki grup bakteri arasındaki dengenin kurulabilmesi gerekmektedir (Chynoweth, 1979). Asit bakterilerinin gereksindiği ortamın pH değeri 5.0 – 6.5 arasındayken, metan bakterilerinin görece alkalın, 6.5 – 7.6 aralığındadır. Mezofilik aralıkta asit bakterileri için optimum sıcaklık 30 °C, metan bakterileri için 35–37 °C'dir. Asit bakterileri yoğun karıştırma, metan bakterileri hassas karıştırma gerektirirler. Asit bakterileri için elverişli olan koşullar, metan bakterileri üzerinde toksik etkiye neden olabilmektedir (Werner vd., 1989; Solera vd., 2002). Bu göz önüne alınarak her iki aşamanın birbirinden ayrıldığı iki kademeli reaktörler planlanmış ve uygulanmıştır. Birincil reaktörde asitlendirme aşaması gerçekleşirken, ikinci reaktörde metanlaştırma gerçekleşmektedir (Chynoweth vd., 1987; Alexiou ve Kamilaki, 1996).

2.8 Biyogaz Oluşumuna Etki Eden Faktörler

Tüm biyolojik proseslerde olduğu gibi, anaerobik fermentasyonda da çevresel şartlar metan oluşumuna etki eder. Bu şartlar sıcaklık ve karıştırma, yükleme oranı, bekletme süresi gibi fiziksel, C/N, pH, alkalinite, toksik maddeler, besi ortamı gibi kimyasal şartlardır (Demuynck vd., 1984).

2.8.1 C/N Oranı

Organik materyaller, saman, çim gibi karbon yönünden zengin, idrar, insan ve tavuk atığı gibi azot yönünden zengin olmak üzere ikiye ayrılabilir. Karbon biyogaz oluşumu için gerekli olurken, azot anaerobik bakterilerin gelişimi ve yeniden üretilmesi için gereklidir (Arnott, 1985). Mikroorganizmalar karbonu enerji kaynağı olarak kullanırlarken, azotu yeni hücrelerin oluşturulmasında yapı malzemesi olarak kullanırlar. Karbon azota göre 25–30 kat daha fazla kullanılır.

Organik madde içerisinde karbonun en önemli kaynağı karbonhidratlar, azot kaynağı ise protein, nitrat ve amonyaktır (Koç vd., 1990; Arnott, 1985). Azot azlığı hücresel gelişimi engellediği için verimi düşürür, çok olması durumunda da amonyak birikimi söz konusu olur ve pH değeri 8,5'a yaklaşır. Bu da sistemin inhibe olmasına neden olur. Böylece kötü kokulu, yanmayan bir gaz elde edilir (Arnott, 1985; Gustavsson, 2000; Verma, 2002; Al-Azzam, 2003). C/N oranının 8'den düşük olması durumunda bu etki görülür (Werner vd., 1989). 15:1 ila 30:1 arasındaki C/N oranları anaerobik fermentasyon için uygun olmaktadır (Jenangi, 1981; Sasse, 1988; Marchaim, 1992). Çizelge 2.3'de bazı materyallerin C/N oranları verilmiştir.

Sığır gibi geviş getiren hayvanların atığında azot daha az bulunur. Çünkü sindirim sırasında bakteriler azotun bir bölümünü kullanır. Bu yüzden diğerlerine göre C/N oranı yüksek olmaktadır (Fry, 1973). C/N oranını ayarlamak için değişik besleme materyalleri karıştırılmalıdır. Örneğin C/N oranı 5-8 civarında oldan tavuk atığıyla, 70 civarında olan samanın karışımı iyi bir besleme materyali olmaktadır (Kishore vd., 1987). Bitki atıklarının 100 olan C/N oranı kompostlama yoluyla bir haftada, 20'ye kadar düşürülebilmektedir (Arnott, 1985).

Çizelge 2.3 Bazı materyallerin C/N oranları (Pound vd., 1981; Stuckey, 1981; Kırımhan, 1981; Arnott, 1985; Vijayalekshmy, 1985; Arnott, 1985; Göğüş, 1986; Werner vd., 1989; Anon., 1999b; Anon., 2000c; Anon., 2001b; Seadi, 2001;).

Materyal	C/N	Materyal	C/N
Hayvansal Atıklar		Bitkisel Artıklar	
Sığır Atığı	6-20	Mısır Sap ve Samanı	30-70
Manda Atığı	23	Pirinç Artığı	50-78
Domuz Atığı	3-20	Mısır Koçanı	50
Koyun Atığı	20-33	Buğday Samanı	80-
At Atığı	24-25	Yulaf Samanı	48-83
Tavuk Atığı	3-15	Yer Fıstığı Kabuğu	31
Ördek Atığı	27	Yer Fıstığı Sap ve	19-20
Bıldırcın	7	Çim Artıkları	15-19
Hayvan İdrarı	0,8-1	Kuru Ot	10-27
Endüstrivel Atıklar		Kaba Yonca	16-20
Mezbaha	2	Soya Fasulyesi Sapı	32-33
Kan	3	Dökülmüş Yapraklar	41-80
Balık Atıkları	5	Pamuk Sapları	30
Meyve	35	Sorgum	100
Sebze Atıkları	35	Patates Kabuğu	25
Küspe	140-	Domates Atıkları	13
Talaş	200-	Lahana Atıkları	13
Sucul Sistem Matervalleri		Hardal	25
Nilüfer	10-21	Yesil Bitkiler	18-30
Algler	5	Eysel Atıklar	
Deniz Yosunu	79-80	İnsan Atıkları	3-10
		Mutfak Atıkları	10-29
		Gazete	812

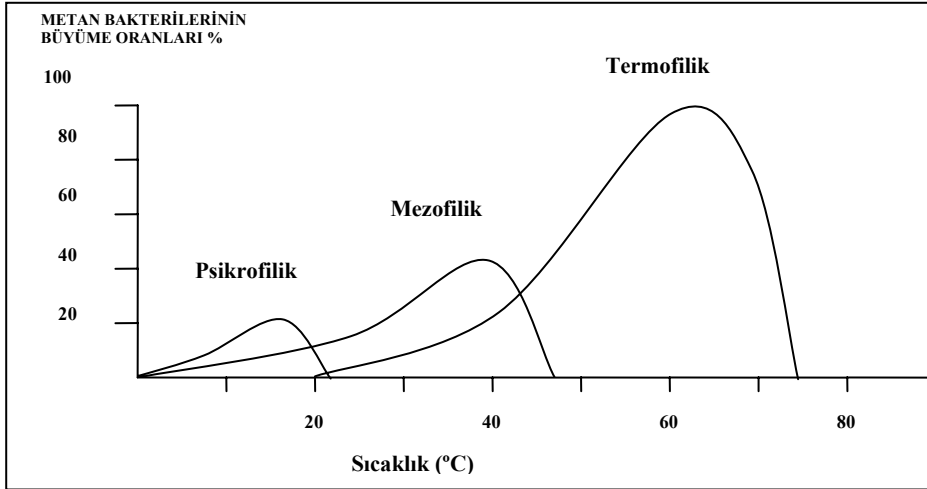
2.8.2 Çalışma Sıcaklığının Etkisi

Anaerobik fermentasyon 3 °C ile 70 °C sıcaklık aralığında gerçekleşebilmektedir (Anon., 1999b). Sıcak su kaynaklarında 85 °C’de yaşayabilen metan bakterileri tespit edilmiştir (Demuynck vd., 1984). Bu sınır bazı çalışmalarda 0-100 °C olarak verilmektedir (Gale, 2001; Kashyap vd., 2003). Sıcaklık azalışı metan oluşum hızına, asitleşme evresinin hızına kıyasla daha çok etki eder. Sıcaklığın artışıyla fermentasyon süresi kısalır (Rajeshwari vd., 2000). Anaerobik fermentasyonda bekletme süresine, atık su ve atık maddelerin türüne, pH ile içerdikleri iyonlara ve bunlara bağımlı olarak oluşan mikroorganizmalar topluluğunun yapısına göre 3 değişik sıcaklık bölgesi vardır:

1- Psikrofilik Fermentasyon (3–20 °C): Bu sistemlerde çürütme hızı çok yavaş olup ortalama bekletme süresi 100-300 gün arasındadır.

2- Mezofilik Fermentasyon (20–40 °C): Anaerobik fermentasyonda en çok uygulanan sıcaklık bölgesidir. Bekletme süreleri 20–40 gün arasında değişir.

3- Termofilik Fermentasyon (40-70 °C): Çürütme hızı daha yüksek dolayısıyla bekletme süreleri daha kısadır (Pekin, 1983; Anon., 1999b). Sıcaklık bölgelerine göre metan bakterilerinin büyüme oranları Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Psikrofilik, Mezofilik ve termofilik metan bakterilerinin büyüme oranları (Klein, 2002).

Psikrofilik sıcaklık bölgesinde çalışmalar nispeten azdır. Fakat yapılan çalışmalarda düşük yükleme hızlarında başarılı sonuçlar alınmıştır. Örneğin Mezofilik bölge için organik yükleme oranı 1–3 kgVS/m³-reaktör. gün iken psikrofilikte bu oran 0,01-0,24 kgUK/m³-reaktör.gün olmaktadır. Ayrıca psikrofilik fermentasyonda besleme materyalinin TK oranı % 5'in altındadır (Kashyap vd., 2003). Düşük sıcaklıklarda biyogaz içerisindeki metan miktarı daha fazla olmaktadır (Sasse, 1988). Fakat 9-15 °C'nin altında biyogaz üretimi hemen hemen durmaktadır (Ruggeri, 1986; Misra vd., 1992).

Mezofilik bölgede optimum sıcaklık 35-37 °C'dir (Stuckey, 1981; Tiwari vd., 1996). Hava sıcaklığının düşük olduğu aylarda, reaktör sıcaklığının 35 °C'den 38 °C'ye çıkarılması, sıcaklık yükselişiyle artan biyogaz miktarından daha fazla tüketime neden olabilmektedir (Wenxiu ve Mengie, 1989).Biyogaz sistemlerinde genellikle mezofilik bölge tercih edilmektedir. Avrupa'da bulunan biyogaz sistemlerinin % 87'si

mezofilik sıcaklık bölgesinde çalışmaktadır. Fakat termofilik ve mezofilik reaktörler arasındaki bu fark azalma eğilimi göstermektedir (Anon., 1980b; Jenangi, 1981; Rajeshwari vd., 2000; Monnet, 2003). Termofilik reaktörler mezofilik olanlara göre daha çok biyogaz üretir, daha küçüktür, patojen ve zararlı giderimi daha fazladır. Ayrıca termofilik reaktörlerde, gübrelemede büyük önem taşıyan zararlı ot tohumu giderimi, mezofilik reaktörlere göre daha yüksek orandadır (El-Mashad vd., 2003). Mezofilik reaktörlerde, sağlık şartlarına uymak için ayrı bir pastörizasyon ünitesi gerekebilir. Termofilik reaktörlerde reaktör m³'ü başına biyogaz üretim verimi, mezofilik reaktörlerden 1,5-2,5 kat daha fazladır ve reaktör boyutları mezofilik reaktörlerin % 30'una kadar düşebilmektedir (Anon., 1997a; Boyd, 2000; Zupancic ve Ros, 2003). Ancak daha fazla enerji girdisi gerektirirler, daha pahalı teknolojiye sahiptirler ve kontrolleri güçtür (Anon., 2000g; El-Mashad vd., 2004a). Ayrıca işletim ve kurulum maliyetleri yüksektir (Rubai vd., 2002). Termofilik fermentasyonda daha fazla H₂S üretimi söz konusudur (Vijayalekshmy, 1985). Fermente atığın gübre değeri termofilik fermentasyonda düşmektedir (Fry, 1973). Bazı çalışmalarda termofilik reaktörlerin, serbest amonyak inhibasyonu nedeniyle, mezofilik reaktörlerden daha az verimli olduğu, ya da bir fark olmadığı, yüksek enerji girdilerinden dolayı termofilik olanların tercih edilmediği belirtilmektedir (Axaopoulos vd., 2001). 42 – 50 °C arasında biyogaz oluşumunda bir kırılma meydana gelir. Bu sıcaklık civarında ne termofilik ne de mezofilik bakteriler aktivitelerini düzgün yürütebilirler (Jenangi, 1981; Demuynck vd., 1984; Arnott, 1985; Marchaim, 1992). Termofilik fermentasyonda optimum sıcaklık 55-60 °C arasındadır. 60 °C'nin üzerinde, sığır gübresiyle yapılan çalışmalarda gaz üretiminin yavaşladığı ve durduğu gözlenmiştir (Sambo vd., 1995). El-Mashad yaptığı çalışmada 50 °C'de, 60 °C'ye göre daha yüksek verim almıştır ve

bunu yüksek sıcaklıkta serbest amonyak miktarının artmasıyla açıklamaktadır (El-Mashad vd., 2003).

Büyük sıcaklık değişimleri anaerobik fermentasyon üzerinde toksik etki yaratır (Jenangi, 1981; Alkhamis vd., 2000). Metan bakterileri ani sıcaklık değişimlerinden yüksek oranda etkilenirler. Eğer günlük sıcaklık değişimleri 5 °C'den fazla olursa, metan bakterileri faaliyetlerini durdurur ve asitleştirme evresi devam ettiği için pH düşer (Koç vd., 1990; Gustavsson, 2000). Mezofilik fermentasyonda izin verilen saatlik sıcaklık dalgalanması +/- 1 olmaktadır (Marchaim, 1992). Fakat sıcaklık dalgalanmalarının bakteriler üzerindeki etkisi uzun dönemli olmamakta, çalışma sıcaklığına dönüldüğünde sistem tekrar dengeye gelmektedir (Stafford vd., 1981). Mezofilik bakteriler, ani sıcaklık artışına düşüşünden daha hassastırlar (Ahn ve Forster, 2002). Mezofilik bölgede çalışan reaktörlerdeki bakterilerin yaklaşık olarak % 10'u termofilik bakterilerdir. Sıcaklığın yükselmesi enzimlerin aktivitelerini artırırken aynı zamanda yapılarını bozmaktadır. Fermentasyon için hayati önem taşıyan proteinlerin geri döndürülemeyen bozunumlara uğraması mümkündür (Harmon vd., 1993). Yapılan bir çalışmada, mezofilik bölgede sıcaklık 15 dakika ve 2 saatlik sürelerde 15-25 °C düşürüldüğünde gaz üretiminin durduğu, fakat 35 °C'ye tekrar dönüldüğünde gaz çıkışının başladığı, sıcaklık düşümünün ters bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Stuckey, 1981). Termofilik reaktörlerde 3 °C 'lik sapmalar sistemin inhibe olmasına neden olur. Saatlik izin verilen maksimum sıcaklık dalgalanması 0,5 °C dir (Vijayalekshmy, 1985; Marchaim, 1992). Bu yüzden sıcaklık kontrolü için termofilik reaktörlerde daha hassas kontrol yöntemlerine ihtiyaç vardır ve bu da yatırım maliyetinin artmasına neden olmaktadır (Anon., 2002f). Termofilik bölgede yukarı doğru olan kısa süreli sıcaklık dalgalanmalarının metan bakterilerine aşağı doğru olan dalgalanmalardan

daha fazla etki ettiği sonucuna varılmıştır (El-Mashad vd., 2004b). 50 °C reaktör sıcaklığında yapılan bir çalışmada, günlük 10 °C sıcaklık dalgalanması olduğunda biyogaz üretiminde % 12’lik bir düşüş olduğu belirtilmiştir (El-Mashad vd., 2003).

2.8.3 Besi Ortamının Etkisi

Anaerobik fermentasyonda en önemli besinler karbonlu, azotlu ve fosforlu besinlerdir. Mikroorganizmalar hücrenin toplam ağırlığının % 11’i kadar azota ihtiyaç duyarlar. Karbon, hidrojen ve oksijen besleme materyalinde bulunan, başta selüloz olmak üzere çeşitli karbonhidratlardan sağlanır (Pekin, 1983; Marchaim, 1992). Anaerobik bakteriler faaliyetlerini sürdürebilmek için azot, fosfor, sülfür, potasyum, kalsiyum, magnezyum, demir, nikel, kobalt, çinko, manganez ve bakır gibi besleyici veya iz elementlere, vitaminlere ve özel koenzimlere gereksinim duyarlar. Hayvan atıklarında besi ortamı uygun olmaktadır. Fakat bazı bitkisel atıkların, endüstriyel atıkların ve yemek atıklarının fermentasyonunda, ek besi ortamına gerek duyulmaktadır (Jenangi, 1981; Marchaim, 1992; Anon., 1999b; Rajeshwari vd., 2000; Solera vd., 2002). Hidrolitik bakteriler hafıf bir besin eksikliği olsa dahi, genel süreci yüksek büyüme hızları dolayısıyla etkilemezler. Asit ve metan bakterileri söz konusu olduğunda ise az bir besin eksikliğinde fermentasyon süreci bozulabilmektedir (Stuckey, 1981).

2.8.4 İnhibitör ve Toksik Maddelerin Etkisi

Ağır metal iyonları, slfıtlar, sülfürler gibi inorganik iyonlar ile birçok organik maddeler anaerobik mikroorganizma topluluğuna toksik ve inhibitör etki yapmaktadırlar (Pekin, 1983). Bu metallerde özellikle demir, nikel ve kobalt düşük oranlarda fermentasyonu hızlandırırken,

düşük sıcaklıklarda toksik etkiye neden olabilmektedirler (Ram vd., 2000). Uzun zincirli yağ asitleri ve dezenfektanlar da toksik etkiye neden olurlar (Anon., 2000a; Klein, 2002). Yüksek konsantrasyonda amonyak, antibiyotik, zararlı ilaçları ve deterjanlar toksik etki yaratan maddelerdir (Vijayalekshmy, 1985). Alkoller yüksek oranlarda toksik etki yaratarak, metan üretiminin azalmasına neden olmaktadır (Koç vd., 1990). Çizelge 2.4’de bazı maddelerin toksik etkiye neden olan sınır derişim değerleri verilmiştir. Reaktöre toksik madde girişı olduğunda metan bakterileri kolaylıkla inhibe olur. Fakat asit bakterilerinin bu şartlara daha dayanıklı olması nedeniyle uçucu organik asit üretimi devam eder ve sistemin verimi düşer (Pullammanappallil vd., 1998). Fermente materyal içerisinde asetik asit seviyesinin 800 mg/l’t üzerine çıkması bunun göstergesidir. Propionik asit/asetik asit oranının 1,4 üzerine çıkması da bu göstergelerden biridir (Pullammanappallil vd., 2001).

Çizelge 2.4 Bazı maddelerin anaerobik fermentasyonda toksik etkiye neden olan sınır miktarları (Werner vd., 1989; Anon., 1999b).

Madde	Derişim (mg/l)
Bakır	100-250
Kalsiyum	8000
Sodyum	8000
Magnezyum	3000
Nikel	100-1000
Çinko	200-1000
Krom	200-2000
Sülfür	200
Siyanür	2

C/N oranı 10'un altında olursa, hammaddenin amonyak zehirlenmesine yol açma olasılığı vardır (Stuckey, 1981; Marchaim, 1992). Fermentasyon sırasında amonyak proteinlerden üretilmektedir (Eldem vd., 2004). Amonyak artışı düşük seviyede olduğu zaman biyogaz üretimini artırırken, yüksek seviyede inhibasyona neden olmaktadır (Sterling Jr. vd., 2001). Amonyak miktarı sığır atıklarında 3-5 g/kg iken tavuk atıklarında 15-20 g/kg'a çıkmaktadır (Steffen vd., 1998). Tavuk atığında protein ve amino asitlerin fazla olmasından kaynaklanan yüksek azot içeriği, amonyumun toksik etkisine neden olabilmektedir (Intrachandra vd., 2002). Amonyum miktarı yaklaşık olarak 1700 mg/l olduğunda inhibasyon etkisi başlar ve 3000 mg/l olduğunda sistem tamamen inhibe olur (Maekawa, 1999). Fakat yeterli zaman verildiğinde sistem bu oranın 5000-7000 mg/l'ye kadar çıkmasına dayanabilir, ancak amonyak miktarı 200-300 mg/l'yi geçmemelidir (Anon., 2000c). Domuz atığı da yüksek oranda azota sahiptir ve fermentasyon sırasında amonyak miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu oranın inhibasyona sebep olmayacak seviyeye indirilmesi için zeolitle ön işlem yapılabilmektedir (Chynoweth vd., 1999). Amonyak inhibasyonu, termofilik bölgede mezofiliğe göre daha fazladır. Bu yüzden domuz ve tavuk atığıyla çalışan biyogaz tesislerinde mezofilik sıcaklık bölgesi tercih edilmektedir (Langhans, 2002). Yüksek sülfürlü materyallerin beslenmesi durumunda, H_2S in oluşumu artar ve toksik etkiye neden olur. Yüksek katı ile çalışan reaktörlerde, amonyak ve H_2S konsantrasyonu da yüksek olacağı için toksik etki muhtemeldir. Bu yüzden sulandırmanın pozitif etkisi vardır (Dennis ve Burke, 2001). Çözünen sülfür miktarı 200mg/l yi geçtiğinde toksik etkiye neden olur. Fakat ortamda metallerin bulunması sülfürün çözünmesini engeller (Stafford vd., 1981; Hansen vd., 1999).

Sığırlara verilen lasalocid ve salinomycin gibi antibiyotikler, termofilik şartlarda anaerobik fermentasyon üzerinde önemli bir etki

yaratmamıştır. Fakat diğer bir antibiyotik olan monensin verildiğinde, mezofilik ve termofilik anaerobik fermentasyon tamamen durmakta ve metan üretiminin tekrar başlaması için yaklaşık 40 gün gerekmektedir (Masse vd., 2000). Hidrojenin kısmi basıncının artması sistemin inhibe olmasına neden olur. Bu limit genellikle 10^{-4} atm civarındadır. Termofilik reaktörlerde, mezofiliklere göre bu limit daha yüksektir (Klein, 2002). Reaktör malzemesi veya parçalarında galvaniz çelik kullanılırsa, metan bakterileriyle temasın kesilmesi gerekmektedir. Çünkü içerdiği çinko metan bakterilerinin ölmesine neden olabilmektedir (Arnott, 1985). 0,01 mg/l çözünmüş oksijen, metan bakterilerinin tamamen inhibe olmasına neden olur (Stafford vd., 1981; Marchaim, 1992). Portakal ve limon kabukları gibi turunçgillere ait atıklar da, toksik etkiye neden olurlar (Mandal ve Mandal, 1997).

2.8.5 pH ve Alkalinitenin Etkisi

Biyogazın oluşum hızına ve biyogazdaki CO_2/CH_4 oranına, pH ve alkalinite büyük ölçüde etki etmektedir. Karışımın pH'ını 4 yapmak için gereken asit miktarı olarak tanımlanan alkalinite değerinin yüksek oluşu, sistemin tampon gücünün fazlalığını gösterir. Alkalinite değerindeki düşme veya gaz içerisindeki CO_2 miktarının artışı, pH düşmeye başlamadan önce sistemin dengesinin bozulduğunu belirten bir ölçektir (Çağlar ve Uçar, 1981; Pekin, 1983; Klein, 2002). 1000–5000 CaCO_3 mg/l aralığında alkalinite değeri anaerobik fermentasyon için yeterlidir (Jenangi, 1981). Metan bakterileri için uygun olan pH aralığı 6,8–7,2 arasındadır (Wereko-Brobby ve Hagen, 1996). pH'ın 6,6–7,6 arasında bulunmasıyla yeterli miktarda gaz üretimi sağlanmaktadır. pH'ın 6,6'nın altına düşmesi metan bakterilerinin faaliyetlerini önemli ölçüde azaltmakta, 6,2'ye düşmesi toksik etki yaratmaktadır. Bu pH değerinde asit üretimi devam etmekte ve asit bakterileri pH değerinin 4,5-5,0

olmasına kadar üretimlerini sürdürmektedirler (Arnott, 1985; Koç vd., 1990; Anon., 1999b; Rajeshwari vd., 2000).

Fermentasyonun başlangıcında pH seviyesinin 6'ya kadar düştüğü gözlenmektedir. Bu asidifikasyon evresi nedeniyle oluşur. Daha sonra metan üretimi aşamasında amonyak derişiminin artışına paralel olarak pH düzeyi artarak, 7-7,5 arasında seyrederek (Jain vd., 1983; Badawi vd., 1992; Verma, 2002). Anaerobik fermentasyon hafifçe alkaline ortamda devam eder. pH değeriindeki dalgalanmalara, sığır gübresinin besleme materyali olarak kullanıldığı reaktörlerde çok nadir rastlanmaktadır (Kishore vd., 1987). Biyogaz alevinde görülen sarı veya kırmızı renk, fermentasyon ortamının asidik olduğunun göstergesidir. pH değeri asite doğru kaydığında kireç veya kül ilavesi sistemi tekrar dengeye getirebilmektedir. Fakat baza kayma durumunda asit ilavesi yapılmamalıdır. Bu sadece H₂S üretiminin artmasına neden olur (Fry, 1973; Arnott, 1985).

2.8.6 Redoks Potansiyelinin Etkisi

Oksidasyon-redüksiyon (O-R) elektriksel bir olaydır ve elektron transferine dayanır. Oksidasyon (elektron kaybı) ve redüksiyon (elektron kazanma) fenomenleri genellikle birlikte meydana gelirler. Eğer, madde çok fazla oksidan ise redoks potansiyeli o oranda büyük olur ve pozitif değeri taşır. Eğer madde redüktan ise, bu değeri düşüktür ve negatiftir. Okside olan ile redükte olan maddelerin konsantrasyonu birbirine eşitse, redoks potansiyeli sıfır olur. Anaerobikler 0,2 V gibi düşük bir redoks potansiyeline gereksinime duyarlar. Aerobiklerde ise bu değeri 0.2-0.4 V'dur (Arda, 2000). Metan bakterileri, yaşamlarını devam ettirmek ve metan üretebilmek için oldukça düşük redoks potansiyeline ihtiyaç duyarlar. Yaklaşık olarak bu değeri 250 mV veya altıdır. Redoks

potansiyelinin yüksek olması durumunda biyogaz üretiminde düşüş görülür. Bu durum genellikle reaktör içerisine kazayla oksijen veya hava girmesi sonucunda oluşur (Demuynck vd., 1984).

2.8.7 Çürütücülerde Kalış Süresinin Etkisi

Uçucu katının reaktörde kalış süresi anaerobik fermentasyonda en önemli faktörlerden birisidir. Hidrolik bekletme süresi ve katı madde bekletme süresi olarak ikiye ayrılır. Tek kademeli karıştırıcılı tip reaktörlerde her iki bekletme süresi de birbirine eşittir. Bekletme süresini etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Katı madde bekletme süresinin çok düşük tutulması, fermentasyon için gerekli zamanın olmaması nedeniyle sistemin çökmesine neden olur. Bu süre çok uzun seçilirse reaktör boyutları artar (Jenangi, 1981). Besi maddelerinin türleri ve miktarları kalış süresine etki eder. Bekletme süresinin artırılması, hayvansal atıklar içerisinde bulunan özellikle selüloz içeriğinin fermentasyonunu sağladığı için, birim atık başına elde edilen biyogaz miktarını artırır (Pekin, 1983; Singh vd., 1985; Dennis ve Burke, 2001). Kesikli beslemede gaz üretimi başlangıçta yüksek olurken, daha sonra azalarak sıfırlanır. İlk evrede gaz üretiminin veya aynı anlamda fermentasyonun % 70-80'i gerçekleşir. İşte bu zaman aralığı, yani reaktöre hammadde girişi ve % 70-80 fermentasyon gerçekleşerek çıkışı arasındaki zaman aralığı bize bekletme süresini verir (Kishore vd., 1987).

2.8.8 Yükleme Oranının Etkisi

Yükleme oranı anaerobik fermentasyonda bilinmesi gereken en önemli özelliklerden biridir. Yükleme oranı genellikle $\text{kg-UK/m}^3\text{-reaktör.gün}$ olarak verilir (Pekin, 1983). Bu değer 1 – 5,8 $\text{kg-UK/m}^3\text{-reaktör.gün}$ arasında değişebilmektedir (Jenangi, 1981; Demuynck vd.,

1984; Kishore vd., 1987; Sasse, 1988; Boyd, 2000; Engler vd., 2002). Mezofilik şartlarda bu değerin 4 kg-UK/m³-reaktör.gün'ü geçmemesi tavsiye edilmektedir (Demuynck vd., 1984). Bazı uygulamalarda 6,4 – 10,5 kg-UK/m³-reaktör.gün arasında değişen yükleme oranlarında çalışılmış ve % 50 UK giderimine ulaşılmıştır. Fakat genel olarak yükleme oranı arttıkça UK giderimi de düşmektedir (Dennis ve Burke, 2001). Anaerobik fermentasyon sırasında yaklaşık % 40-50 UK giderilir (Sasse, 1988; Boyd, 2000). UK miktarı bize biyogaz üretimiyle ilgili kesin sonuç vermez. Çünkü lignin içeriği yüksek olduğunda UK oranı da yüksek olmasına rağmen, ligninden biyogaz oluşumu çok zor olmaktadır (Vijayalekshmy, 1985; Wilkie, 2003).

Yükleme oranı çok yüksek olursa, ortamın pH değeri düşer ve inhibasyon meydana gelir. Bunun nedeni metan bakterilerinin H₂'i yeterli hızda uzaklaştıramaması sonucunda asit bakterilerinin baskın hale gelmesi ve uçucu organik asit üretiminin artarak asit birikiminin oluşmasıdır. Bu da sistemin dengesinin bozulmasına neden olur (Van Die, 1987; Werner vd., 1989; Siegert ve Banks, 2005). Bu durumu önlemek için bu oranı derece derece artırmak gerekir (Jenangi, 1981). YO, Yükleme oranı (kg-UK/m³-reaktör.gün), TK, toplam katı miktarı (%) ve HBS, hidrolik bekletme süresi (gün) için;

$$YO = k \cdot \frac{TK}{HBS} \quad (2.1)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Sığır gübresinde k değeri yaklaşık 7 olarak alınabilmektedir (Kishore vd., 1987).

Katı madde oranına göre biyogaz sistemlerinde kullanılabilecek materyaller üç bölüme ayrılabilir:

- 1- Düşük katı, % 2–10 ve altı TK,
- 2- Orta katı, % 10–20 TK,
- 3- Yüksek katı, % 20–40 TK (Chynoweth ve Pullammanappallil, 1996; Chavez-Vazquez ve Bagley, 2002; Monnet, 2003).

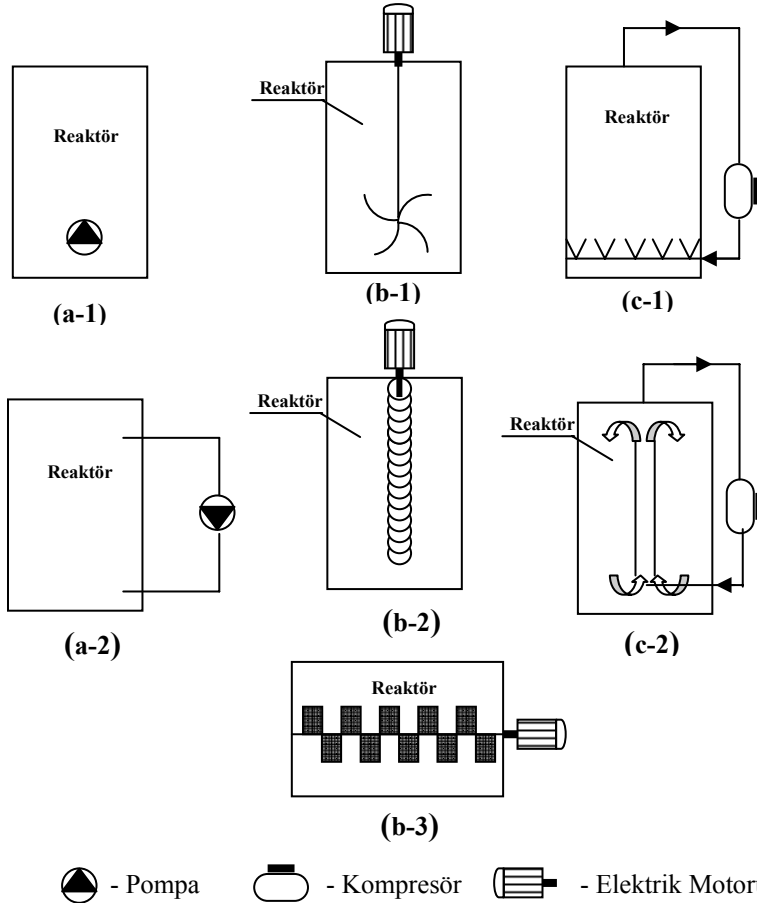
Katı madde oranı çok düşük olduğunda, materyal içerisindeki katının çökmesi söz konusudur. Bu oran çok yüksek olursa gaz çıkışının engellenmesiyle karşılaşılır (Al-Azzam, 2003). Besleme materyalinin % 8-13 arasında TK'ya sahip olması, biyogaz üretimi için uygun olmaktadır (Palmer, 1981; Singh vd., 1984; Arnott, 1985; Kishore vd., 1987; Koç vd., 1990). Hayvan atıklarının toplanması sırasında fazla oranda su kullanılması durumunda TK oranı % 2-5'e kadar düşebilmektedir. Bu da suyu ısıtmak için çok enerji harcanmasından dolayı sistem verimini düşürür (Boyd, 2000). Hayvansal atıkların kullanıldığı yüksek katı sistemlerde toplam katı oranı % 22-25'e kadar çıkabilmektedir. Bu sistemlerde kesikli besleme kullanılmakta, atmosfere açık olarak bekletilen hammaddenin aerobik fermentasyonu sırasında oluşan 60–70 °C sıcaklık, daha sonraki havasız ortamda reaktörün ısı ihtiyacı olarak kullanılmakta ve yalıtımla ısı kaybı azaltılmaktadır. Bu sistemlerde bekletme süresi 30 gün olarak gerçekleştirilmektedir (Sarapatka, 1993). Yüksek katı miktarlarında asetik asit birikmesi yüzünden inhibasyon meydana gelir. Yapılan çalışmalarda nem oranının % 68 olması sınır değer olarak bulunmuştur. Bu nem oranına yakın besleme materyali kullanıldığında, oluşan prosese kuru fermentasyon adı verilmektedir (Vijayalekshmy, 1985).

2.8.9 Karıştırmanın Etkisi

Karıştırma, üretilen biyogazın materyalden uzaklaştırılması, besleme materyalinin bakterilerle temasının sağlanması, çökelmenin ve köpük oluşumunun engellenmesi, homojen sıcaklık dağılımının sağlanması, bakteri dağılımının homojenleştirilmesi, reaktör içerisindeki ölü bölgelerin azaltılarak efektif reaktör hacminin artırılması için gereklidir (Kishore vd., 1987; Köse, 1998; Anon., 1999b). Ayrıca besleme materyalinin içerisinde bulunan büyük parçacıkların küçültülmesi ve kütle aktarım dirençlerinin azaltılması için de karıştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Çağlar ve Uçar, 1981; Burton ve Turner, 2003). Eğer besleme materyali içerisinde topaklaşma varsa, biyogaz üretimi düşer (Arnott, 1985). Karıştırmanın olmadığı reaktörlerde durgun bölgeler oluşmakta, eşit olması gereken hidrolik ve katı bekletme süreleri farklılaşarak katı bekletme süresi artmaktadır. Bu da reaktör içerisinde katı madde konsantrasyonunun artmasına, zamanla reaktör efektif hacminin azalarak tıkanıklıkların oluşmasına yol açmaktadır (Tushar ve Ghos, 1990). İyi ve uygun bir karıştırma, biyogaz üretimini % 50 oranında artırmaktadır (Anon., 1999c). Fakat günde bir kere karıştırmanın, sürekli karıştırmaya göre, gaz verimine çok fazla etki etmediği belirtilmektedir (Çağlar ve Uçar, 1981).

Karıştırma sistemleri, fermentasyon materyalinin sirküle edildiği hidrolik karıştırma, biyogazın sirküle edildiği biyogazlı karıştırma ve mekanik karıştırma olmak üzere üçe ayrılabilir. Bu sistemlere ait çeşit ve uygulama şemaları, Şekil 2.4'de verilmiştir. Mekanik karıştırma sistemleri genellikle 100 m³ hacimden düşük sistemlerde kullanılır. Hidrolik karıştırma en çok tercih edilen sistemdir (Demuyneck vd., 1984). Mekanik karıştırmada devir sayısı 15–50 dev/dak arasında seçilmelidir. Dalgıç tip karıştırıcılar ve dahili pompaların kullanımı soğutma nedeniyle

40 °C üzerinde yani termofilik reaktörlerde mümkün değildir (Burton ve Turner, 2003). Hidrolik karıştırmada mekanik ekipmanın dışarıda olması, bakım ve tamir kolaylığı sağlar (Stafford vd., 1981).



Şekil 2.4 Karıştırma sistemleri (Demuynck vd., 1984):

- Hidrolik karıştırma sistemleri: 1) Dahili pompalı 2) Harici Pompalı
- Mekanik karıştırma sistemleri: 1) Pervaneli 2) Helezonlu 3) Paletli
- Biyogazlı karıştırma sistemleri: 1) Biyogaz difüzyonuyla karıştırma 2) Biyogazın kaldırma kuvvetiyle karıştırma

Yavaş bir şekilde karıştırma, hızlı ve verimli bir fermentasyon için gerekli olmaktadır. Genellikle günlük yüklemelerdeki hareket, gaz

çıkışının ve termal taşınımın etkisi karıştırmayı doğal yoldan sağlamaktadır (Jenangi, 1981; Sasse, 1988). Fakat büyük reaktörlerde ve yüksek yükleme oranlarında bu karıştırma etkisi yetersiz kalmaktadır. Yeterli karıştırma, reaktör içerisinden çeşitli yerlerden alınan numunelerdeki katı madde oranlarındaki farklılaşmanın % 10'un altında olmasıyla belirlenebilir. Kum ve diğer çökeltilerin biriktiği alt bölüm ve yoğunluğun az olduğu üst bölgedeki köpük formu bu değerlendirmenin dışında tutulmalıdır (Schlicht, 1999). Aşırı ve hızlı karıştırma sonucunda birbirleriyle ilişkili bakterilerin teması kaybolmakta, işlevlerini yerine getirememelerinden dolayı sistem verimi düşmektedir (Anon., 1999b; Verma, 2002; Karim vd., 2005c). En uygunu dört saatte bir, hassas karıştırmadır (Sasse, 1988; Anon., 1999c). Hidrolik karıştırmada önerilen, yüksek katı madde miktarına sahip reaktörlerde 20 dakikada reaktör hacminin tamamen sirküle edilmesidir. Düşük katı madde miktarlarında bu süre 30 dakika olmalıdır (Schlicht, 1999). Hidrolik karıştırmada minimum karıştırma toplam hacmin günde bir defa sirküle edilmesidir (Stafford vd., 1981). Karıştırmalı reaktörlerde hidrolik bekletme süresi karıştırmasızlara göre daha düşük olmaktadır (Sasse, 1988; Anon., 1999c; Keshtkar vd., 2003). Mekanik karıştırıcı gücünün pratik hesabı şöyledir (Balsam, 2002):

$$P = 0,0066 \cdot TK \cdot V_R \quad (2.2)$$

Burada P elektrik motorunun gücü (HP), TK toplam katı madde oranı (%) ve V_R reaktör hacmi (m^3) olmaktadır.

Tesisin ilk çalıştırma aşamasında karıştırma, pH düşüklüğü ve sistem dengesizliği yarattığı için önerilmemektedir. % 5 TK oranına sahip materyalin fermentasyonunda karıştırıcılı ve karıştırıcısız reaktörler arasında biyogaz verimleri açısından önemli bir fark yoktur. Çünkü bu

düşük TK oranlarında gaz çıkışı gerekli karıştırmayı doğal olarak sağlamaktadır (Karim vd., 2005c). Fakat % 10 ve üzeri TKM oranına sahip materyallerin fermentasyonunda karıştırma, verimi % 30'lara varan oranda artırabilmektedir (Karim vd., 2005b). Yine % 15 TKM oranı ve üzerinde biyogazın sirkülasyonu ile karıştırmanın yeterli olmadığı belirtilmektedir (Karim vd., 2005a).

2.8.10 Basıncın Etkisi

Reaktör içerisinde oluşacak basıncın anaerobik bakterilere ve dolayısıyla biyogaz üretim verimine etkisi söz konusudur. Literatürde konuyla ilgili olarak 0,75 – 1,5 kPa mutlak basınç aralığının, biyogaz üretimi için ideal olduğu ve bunun üzerindeki basınçlarda üretimin zorlaşacağı belirtilmektedir (Arnott, 1985). Fakat özellikle büyük reaktörlerin alt kısmında bulunan metan bakterileri oldukça büyük hidrolik basınç altında faaliyetlerini sürdürmektedir ve bir performans düşüklüğü rapor edilmemiştir (Chynoweth and Isaacson, 1987). Yine bazı çalışmalarda, biyogaz üretiminin engellenmeden devam edebileceği basınç sınırı 120 kPa (gösterge) olarak verilmiştir (Nijaguna, 2002). Diğer bir çalışmada, reaktör içerisinde oluşacak 3,75 kPa negatif basıncın, termofilik fermentasyonda, metan üretimini % 5 arttırdığı belirtilmiştir (Chynoweth and Isaacson, 1987). Özellikle reaktör içerisindeki basınç değişimlerinden, toksik etki yaratacağı için kaçınılması gerektiği vurgulanmaktadır (Vavilin et al., 1995). Basınç yükseldiğinde metana göre 40 kez daha fazla çözünbilme özelliğine sahip CO₂'nin sıvı içerisindeki konsantrasyonu artmaktadır. Bu yüzden biyogaz içerisindeki metan oranı da yükselmektedir (Alvarez vd., 2006).

2.9 Biyogaz Reaktörleri

Reaktörler genellikle besleme şekline göre kesikli beslemeli tip ve sürekli beslemeli tip olarak ikiye ayrılırlar. Kesikli beslemeli tip reaktörlerde, besleme materyali reaktöre bir kere doldurulur ve gaz çıkışı bitene ya da azalana kadar beklenir. Daha sonra boşaltılarak tekrar yeni materyal eklenir. Bu tip reaktörler, besleme materyalinin yeterli miktarda bulunmadığı ya da dönemsel olarak bulunabildiği yerlerde veya besleme materyalinin iri taneli bir yapıya sahip olduğu yerlerde avantajlı olmaktadır. Ayrıca besleme ve boşaltma sırasındaki çalışmaları göz ardı edersek, kesikli beslemeli tip reaktörlerin günlük bakımı oldukça kolaydır. Fakat biyogaz üretimi düzensizdir. Bu sorun farklı zamanlarda doldurulan birkaç kesikli reaktörün gaz çıkışlarının birleştirilerek gaz depolama tankına verilmesiyle çözülebilir. Fakat bu çözüm ilk yatırım maliyetini artırmaktadır (Arnott, 1985).

Sürekli beslemeli tip reaktörlerde, materyal düzenli aralıklarla eklenir ve eklenen materyal kadar fermente olmuş materyal boşaltılır (Palmer, 1981; Jenangi, 1981; Arnott, 1985). Sürekli beslemeli tip reaktörlerde ideal olan kesintisiz besleme ve boşaltmadır. Fakat pratikte bu uygulanamamaktadır (Stafford vd., 1981).

Geleneksel biyogaz sistemlerinde reaktör hacmi,

$$V_R = GBM \cdot HBS \quad (2.3)$$

Eşitliğiyle hesaplanabilmektedir. Burada V_R reaktör hacmi (m^3), GBM günlük besleme miktarı ($m^3/gün$) ve HBS hidrolik bekletme süresi (gün)'dür (Kishore vd., 1987). Katı bekletme süresinin (KBS) uzun olması biyogaz veriminin artmasını sağlar. Fakat konvansiyonel tek

kademeli karıştırılmalı tip reaktörlerde KBS'nin HBS'ye eşit olması, reaktör hacminin büyümesine ve ilk yatırım maliyetlerinin artmasına neden olur (Chynoweth vd., 1987). Bu nedenle her iki bekletme sürelerinin farklılaştığı yüksek hızlı reaktörler dizayn edilmiş ve uygulanmıştır. Ayrıca asitleştirme ve metan üretimi aşamalarının farklı reaktörlerde gerçekleştirildiği tasarımlar mevcuttur. Bu reaktörlerin başlıca çeşitleri şunlardır (Vijayalekshmy, 1985; Kansal vd., 1998; Rajeshwari vd., 2000; Nelson ve Lamb, 2002):

- Anaerobik filtre reaktörler,
- Katı- Yukarı akışlı reaktörler,
- Katı dönüşümlü karıştırılmalı tip reaktörler,
- Yukarı akışlı anaerobik reaktörler,
- Anaerobik kontakt reaktörler,
- Akışkan yataklı reaktörler,
- Sabit filim reaktörler,
- Ardışık kesikli tip reaktörler,
- İki fazlı reaktörler.

HBS'nin KBS'den farklı olduğu anaerobik kontakt reaktör, anaerobik filtre reaktör gibi reaktör tasarımlarında, KBS kısaltılmakta, bu sayede de reaktör boyutları düşürülebilmektedir. Fakat bu tip reaktörlerde, izin verilen katı madde miktarı genellikle % 1-3 civarındadır (Chynoweth, 1987; Marchaim, 1992; Anon., 1996). Özel tasarımı, yüksek hızlı reaktörler, çiftçiler tarafından kabul görmemektedir. Bunun nedeni karmaşık olmaları, işletimde özel bilgi gerektirmeleri ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Ruggeri, 1986). Düşük katı madde miktarı ve partikül boyutuna ihtiyaç duyulması nedeniyle bu tip reaktörler hayvansal atıklar için uygun değildir (Dennis ve Burke, 2001). Bununla beraber bu tip reaktörler özellikle hayvansal

atıkların suyla yıkandığı işletmelerde ekonomik olabilmektedir. Çünkü yıkama sırasında TK oranı % 1'e kadar düşmekte, bu da geleneksel reaktörlerde bekletme süresine bağlı olarak reaktör boyutunun ve ısı ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Anaerobik filtre reaktör gibi yüksek hızlı reaktörlerde ise bekletme süresi üç güne kadar düşürülebilmekte, reaktör boyutları azalmaktadır (Wilkie, 2003). Fakat hayvansal veya lifli atıkların bu reaktörlerde kullanılması halinde, ön arıtma, parçalama ve sulandırma işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Peck ve Hawkes (1987) yaptıkları deneysel çalışmada sığır atığını yukarı akışlı anaerobik filtre reaktörde denemişler, % 4,4 katı madde oranında, bir kaç tıkanma sorunu dışında başarılı olmuşlardır. Fakat besleme materyalini ön işleme tabi tutarak, 3 mm partikül büyüklüğü formuna getirmişlerdir. Ayrıca anaerobik filtre reaktörlerde, akışın zorlanmaya maruz kalması nedeniyle pompalama için gerekli enerji yükselir (Anon., 1980b). İki fazlı reaktörlerde asidifikasyon aşamasının gerçekleştirildiği evrede, H_2 'nin yanı sıra CO_2 ve asetik asit üretilmektedir. Buradan alınan materyal metanlaştırma reaktörüne gönderilmektedir. Karbonhidratlarca zengin olan materyallerin kullanımı durumunda, elde edilen H_2 sistem verimini yükseltmektedir (Martí'nez-Pe'rez vd., 2007). Fakat bu tip reaktörler de küçük ölçekli kırsal kesim uygulamalarında ekonomik değildir (Krich vd., 2005). Yüksek hızlı reaktörlerden olan ardışık kesikli tip reaktörler, uzun süreli uzay görevlerinde astronotların organik atıklarının arıtılması için önerilmektedir (Teixeira vd., 2004). Anaerobik mezofilik reaktörlerde patojen giderimi, termofilik reaktörlere göre daha az olmaktadır. Bu yüzden, domuz atığının besleme materyali olarak kullanıldığı bazı uygulamalarda, bekletme süresi bir gün ve çalışma sıcaklığı 62 °C olan aerobik termofilik reaktör, bekletme süresi 14 gün, çalışma sıcaklığı 37 °C olan anaerobik mezofilik reaktörle birlikte çalıştırılmış, patojen giderimi ve sistem veriminin arttığı, H_2S üretiminin azaldığı tespit edilmiştir (Pagilla vd., 2000).

Ayrıca biyogaz sistemleri ölçeklerine göre üçe ayrılabilir:

- 1- Küçük ölçekli çiftlik tipi sistemler,
- 2- 20–30 çiftliğin paylaştığı müşterek biyogaz sistemleri,
- 3- Büyük ölçekli merkezi biyogaz sistemleri.

Genellikle kullanılan ilk iki ölçekteki tesislerdir. Özellikle sahip olunan hayvan sayısının iki civarında olduğu ailelerin bulunduğu Nepal ve Hindistan gibi ülkelerde müşterek biyogaz tesisleri daha fazla tercih edilmektedir. Bu tesislerde reaktör m³'ü başına maliyetler, daha az otomasyon elemanı kullanımı ve basit dizaynlarından dolayı daha düşüktür. Merkezi biyogaz tesisleri daha çok gelişmiş ülkelerde bulunmaktadır. Avrupada bulunan biyogaz tesislerinin sadece % 50'si çiftlik tipi küçük ölçeklidir (Boyd, 2000).

2.10 Biyogaz Depolama Sistemleri

Biyogaz üretimi, belirli ve sabit fermentasyon şartlarında süreklilik göstermektedir. Oysa özellikle orta ve küçük ölçekli biyogaz tesislerinin bulunduğu kırsal bölgelerde, biyogazın kullanım miktarı gün içinde ve mevsimsel olarak önemli miktarlarda değişmektedir. Biyogazın sadece sıcak su hazırlama, ısıtma ve pişirme amaçlı kullanıldığı küçük ölçekli tesislerde, gece boyunca 10-12 saat tüketim olmamaktadır. Bu yüzden bu süre boyunca üretilen biyogazın depolanabilmesi gereklidir (Datong, 1989). Elektrik üretiminin gerçekleştirildiği tesislerde de, meydana gelecek pik yükleri karşılayabilmek için, tüketimin en az olduğu zaman dilimlerinde üretilen biyogazın depolanması sistem tasarımında göz önüne alınmalıdır (Anon., 2000a). En uygun gazometre hacminin belirlenmesinde, biyogazın nasıl, ne oranda ve ne sıklıkla kullanıldığı göz önüne alınmalıdır (Arnott, 1985).

Biyogaz reaktörlerinde üretilen gaz ya reaktöre entegre, ya da ayrı bir gazometrede depolanmaktadır. Ayrı olarak depolamada, basınç değerlerine bağlı olarak gazometreler, düşük, orta ve yüksek basınçlı olmak üzere üç grup içinde sınıflandırılmaktadır. Bu depolama şekilleri ve gazometre tipleri Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5 *Biyogaz Depolama Sistemleri* (Jenangi, 1981; Walsh vd., 1989; Datong, 1989; Werner vd., 1989; Anon., 2000c; Fischer ve Krieg, 2002a).

Basınç	Biyogaz Depolama Sistemi	Depo Malzemesi
Düşük (1 – 41,4 kPa)	Hareketli Kubbeli Biyogaz Depolama Tankı	Çelik, plastik
Düşük (1 – 41,4 kPa)	Torba Tipi Biyogaz Depolama Ünitesi	Kauçuk, plastik, vinil
Orta ($\approx 100 - 2000$ kPa)	LPG veya Propan Tankı	Çelik
Yüksek ($>20 \times 10^3$ kPa)	Yüksek Basınçlı Gaz Depolama Tankı	Alaşımlı Çelik

Düşük basınçta depolamada, kış şartlarına, yani sistemin ısı ihtiyacından geriye kalan biyogazın kullanımına bağlı olarak gazometre dizayn edilirse, yaz şartlarında artan biyogazın yakılarak atılması gerekebilir. Yaz şartlarına bağlı olarak dizayn edilmesi, gazometre hacminin ve dolayısıyla maliyetinin artmasına neden olur (Stafford vd., 1981). Literatürde genellikle gaz depolama hacminin, üretilen günlük

biyogaz miktarı kadar olması gerektiği belirtilmektedir (Arnott, 1985). Uygulamalardan elde edilen deneyimler, küçük ve orta ölçekli biyogaz tesislerinde gaz depolama sistemlerinin, günlük üretilen biyogazın % 40-60'ını depolayabilecek hacimde olması gerektiğini göstermektedir (Vijayalekshmy, 1985; Sasse, 1988; Werner vd., 1989; Marchaim, 1992; Anon., 1999c). Hindistandaki uygulamalarda, günlük biyogaz üretiminin 1/3'ü büyüklüğünde gaz depolama üniteleri kullanılmaktadır (Gustavsson, 2000). Fakat genellikle, gazometrelerin en az günlük üretimin yarısını depolayacak şekilde yapılması önerilmektedir (Wase ve Forster, 1984; Tiwari vd., 1996). Gazometre hacmini belirlemede özellikle iki yaklaşım önemlidir. Saatlik maksimum gaz ihtiyacı g_{cmax} (m^3/h), maksimum kesintisiz kullanım süresi t_{cmax} (h) olmak üzere, gerekli gazometre hacmi V_{g1} (m^3);

$$V_{g1} = g_{cmax} \cdot t_{cmax} \quad (2.4)$$

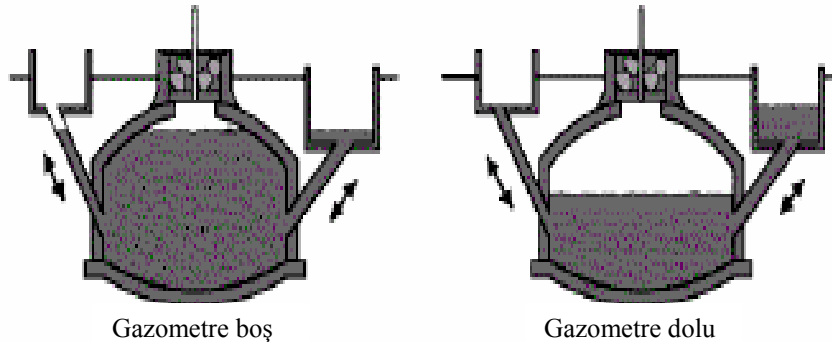
formülüyle hesaplanır. Ayrıca saatlik biyogaz üretimi G_b (m^3/h), gaz tüketiminin sıfır olduğu maksimum süre t_{zmax} (h) olmak üzere, gerekli gazometre hacmi V_{g2} (m^3);

$$V_{g2} = G_b \cdot t_{zmax} \quad (2.5)$$

bağıntısıyla bulunur. Bu iki değerden en büyük olanı gazometrenin hacmini belirler. Öngörülemeyen sapmaları karşılayabilmek için bu değerlerin üzerine % 10–20 emniyet payı eklenir (Werner vd., 1989; Anon., 1999c).

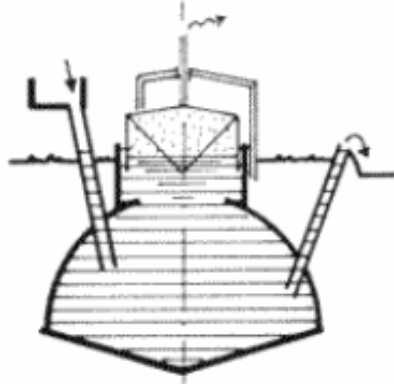
Gazometresi reaktöre entegre edilmiş sabit kubbeli biyogaz tesislerinde, ayrı bir gaz depolama tankı kullanılmadığı durumlarda, reaktörün üst kısmı gaz depolama amacıyla kullanılmaktadır. Basınç

boşaltma tankının seviyesi ve reaktördeki materyalin seviyesi arasındaki farkla oluşur ve değişkendir. Eğer gaz kullanımı olmazsa, artık gaz yükleme ve boşaltma tanklarından baloncuklar şeklinde kaçır (Kishore vd., 1987; Datong, 1989). Sabit kubbeli tip reaktörlerde gaz depolama hacmi günlük gaz üretiminin % 33 ü kadardır (Raheman, 2002). Bu hacim genellikle reaktör hacminin $1/5 - 1/8$ 'i olarak projelendirilir. (Werner vd., 1989). Şekil 2.5’de sabit kubbeli biyogaz reaktörü ve basınç değişimi gösterilmiştir.



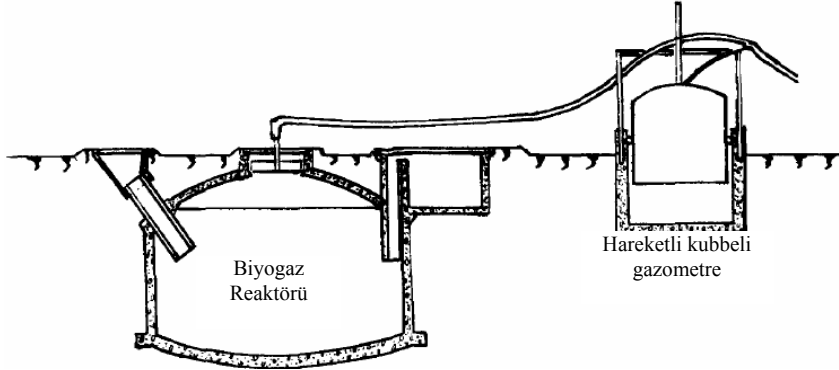
Şekil 2.5 Sabit kubbeli biyogaz reaktörü ve gaz basınçlandırma prensibi (Anon., 1999c).

Hareketli kubbeli biyogaz reaktörlerinde ise gaz depolama tankı reaktörün üst kısmına entegre edilmiştir. Bu reaktörlerde gaz basıncı sabittir ve hareketli kubbenin ağırlığıyla ayarlanabilmektedir. Uygulamalarda genellikle hareketli kubbe ekseninde çevrilerek materyalin karıştırılması sağlanmaktadır (Göğüş, 1986). Şekil 2.6’da bu tip bir reaktör görülmektedir.



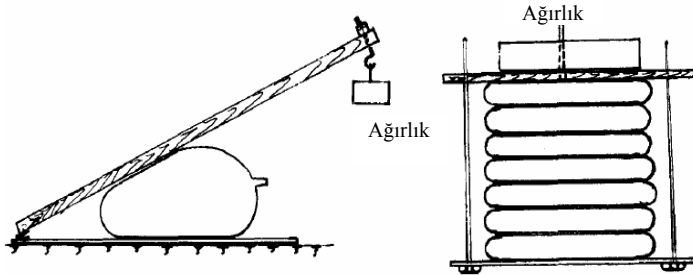
Şekil 2.6 Hareketli kubbeli biyogaz reaktörü

Küçük biyogaz tesislerinde gaz depolama sisteminin ayrı olarak kullanımı, özellikle reaktör ve gaz kullanım yerinin arasındaki mesafe 50–100 m'nin üzerinde olduğunda gerekli olmaktadır. Bu tip tesislerde düşük basınçlı gaz depolama sistemleri tercih edilmektedir. Gaz sızdırmazlığının genellikle su ile sağlandığı, üst kısmı hareketli, iç içe geçmiş iki silindirik tanktan oluşan hareketli kubbeli biyogaz depolama tankı en sık rastlanan sistemlerdendir. Bu sistemlerde gaz iletimi ve kullanımı için gerekli basınç, hareketli kısmın ağırlığıyla ayarlanmaktadır ve sabittir. Şekil 2.7'de örneği verilen bu tanklarda basıncın 20 cmSS'ni geçmemesi gerekir. Eğilmeler ve takılmalardan oluşan sorunlar, kılavuz direğinin kırılması bu tip gazometrelerin en önemli problemleridir. Galvaniz çelik, betonarme ve plastik malzemeden yapılabilirler (Arnott, 1985; Werner vd., 1989; Kalia ve Singh, 1999).



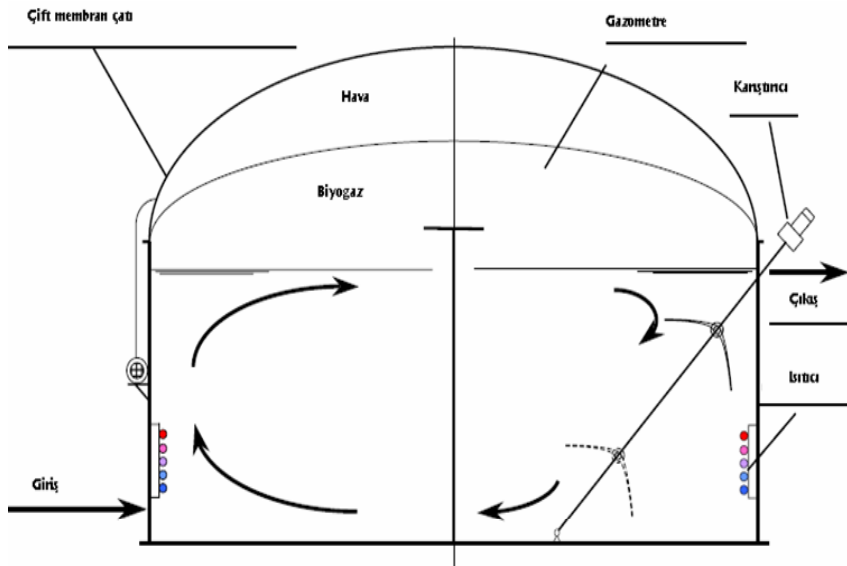
Şekil 2.7 Hareketli kubbeli gazometre (Datong, 1989).

Gaz torbası şeklinde, genellikle kauçuk ve vinil malzemeden yapılan biyogaz depoları da küçük tesislerde tercih edilmektedir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi çeşitli şekillerde üretilen bu depolarda gerekli basınç, üretim malzemesinin elastikiyetinden faydalanarak sağlandığı gibi, depo üzerine ilave ağırlık konarak da elde edilebilmektedir (Gustavsson, 2000; Anon., 2000c). Gazometresi reaktör ile entegre olan balon tip üreteçlerde 10–12 mbar basıncı sağlamak için yaklaşık olarak 150–200 kg kum torbası kullanılmaktadır (Kanwar ve Guleri, 1994). Bu depolama şeklinde özellikle kemirgen hayvanlardan ve dış darbelerden oluşan delikler önemli bir sorundur (Chanakya vd., 2005).



Şekil 2.8 Torba tipi gazometre

Torba tipi gazometrelerin çalışma prensibinden hareketle, modern tesislerde, reaktöre entegre ve ayrı olarak çift membranlı gazometreler dizayn edilmiştir. Bu tip gazometrelerde içte ve dışta iki membran bulunmaktadır. İçteki membran biyogazın depolanmasını sağlarken, dıştaki membran hava şartlarından iç membranı korumaktadır. Gazometre içerisindeki basınç, iki membran arasına hava basılarak sabitlenmektedir. Şekil 2.9’de reaktöre entegre çift membranlı gazometre görülmektedir (Fischer ve Krieg, 2002b).



Şekil 2.9 Çift membran çatılı biyogaz reaktörü

Biyogazın % 60-80’lik kısmını oluşturan CH_4 , LPG ve propan gibi düşük basınçlarda sıvılaştırılamamaktadır. Biyogaz sıvılaştırılmadan, görece orta basınçlarda çelik veya alaşımlı depolarda depolanabilir. Fakat kırsal kesim uygulamalarında bu tip depolama ekonomik ve güvenli değildir (Marchaim, 1992). Özellikle taşıtlarda kullanım söz konusu olduğunda, kısa mesafeler için, elde edilen biyogaz 100 – 1000 kPa

düzeyine basınçlandırılarak, LPG ve propan tanklarında depolanabilmektedir (Werner vd., 1989). Bu şekilde orta basınçta depolamada, genellikle LPG tüplerinde olduğu gibi 17 bar basınç sağlanabilmektedir. Bu durumda, 12 kg'lık LPG tüpü (26,2 lt hacim) ve yaklaşık olarak % 60 CH₄ oranına sahip biyogaz göz önüne alındığında, 5 kWh enerji depolanmış olmaktadır. Bu basınçlandırma sırasında, depolanan biyogazın enerji içeriğinin yaklaşık olarak % 10'u harcanmaktadır (Krich vd., 2005). Fakat özellikle uzun mesafeler söz konusu olduğunda, biyogazın 28 – 35 MPa basınç düzeyinde yüksek basınçlı gaz depolarında, sıvılaştırılarak depolanması mümkündür (Jenangi, 1981). Biyogaz ve metan basınç altında sıkıştırılmada ideal gaz gibi davranır. Yüksek basınçlarda depolamada kademeli basınçlandırma uygulanır. Yüksek basınçta depolamada önemli olan, biyogazın içerdiği CO₂ nin, CH₄ oranı minimum % 95 olacak şekilde giderilmesinin gerekliliğidir (Monnet, 2003; Gustavsson, 2000; Bayhan ve Zablocki, 1991; Camargo, 1986;). İçerisine kokulandırıcı eklenmesi, kaçakların tespiti için gereklidir (Cheng-qui vd., 1989). Biyogazın yüksek basınçlarda sıvılaştırılarak depolanması ve araçlarda kullanılması, mevcut teknolojiler göz önüne alındığında ekonomik olmamaktadır. Yatırım maliyeti, enerji tüketimi ve güvenlik önlemleri, bu uygulamaların çoğunlukla büyük sistemlerde gerçekleştirilebilmesine neden olmaktadır (Fredriksson vd., 2006).

Çoğu biyogaz tesisinde çalışma basıncı, 76 mbar'ın altındadır (Walsh vd., 1989). Genel olarak biyogaz sistemlerinin çalışma basıncı 10 mbar civarındadır. Hareketli kubbeli reaktörlerde bu basınç genellikle 4–8 mbar olmaktadır (Marchaim, 1992). Kazanlarda ve diğer yakma sistemlerinde gerekli olan gaz giriş basıncı genellikle 8–25 mbar civarındadır. Verimli çalışma için bu basınç değerlerinin altına düşmemek gerekmektedir (Vijayalekshmy, 1985; Anon., 1999a). Bu

nedenle biyogazın kullanılacağı ekipmanın, biyogaz sistemine mümkün olduğu kadar yakın inşa edilmesi gerekmektedir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, iletim hatlarının basınç kayıpları hesaplanmalı ve boru çapı seçimi bu hesaplara uygun yapılmalıdır. Borularda basınç kaybı hesabında, Q gaz debisi (m^3/h) olmak üzere,

$$Q = C \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot d^5}{s \cdot L} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

ampirik formülü kullanılabilir. Burada ΔP basınç düşümü (cmSS), d boru çapı (cm), s biyogazın bağıl yoğunluğu, L toplam boru uzunluğu (m), C sürtünme katsayısıdır. Bu katsayı plastik borular için 2,8, galvaniz borular için 2,24 olarak alınabilir (Kishore vd., 1987). Gaz bağlantılarında yaklaşık % 2 eğim ile kondens alımı gerçekleştirilmelidir (Werner vd., 1989). Reaktör çalışma basıncının yetersiz olduğu durumlarda, kullanım basınç ihtiyacını karşılamak amacıyla, biyogaz kompresörlerle basınçlandırılmaktadır (Krich vd., 2005).

2.11 Reaktör Isıtma Sistemleri

Isıtma sistemi olmayan biyogaz sistemleri, sadece sıcak iklim kuşağındaki bölgelerde mümkün olmaktadır. Türkiye gibi yaz ve kış aylarındaki sıcaklıkların çok farklı olduğu ülkelerde, sistemin stabilitesini sağlayabilmek için reaktör ısıtma sistemi gereklidir (Anon., 2000c). Reaktörün ısıtılmasında genellikle elektrik, fosil yakıtlar veya üretilen biyogaz kullanılır. Bu durum, ekonomik yönden işletme masraflarının artmasına ve net enerji eldesinin düşmesine neden olur. Güneş gibi yenilenebilir kaynakların kullanımı bu dezavantajları azaltmak için önemli bir alternatiftir (El-Mashad vd., 2004a). Söz konusu enerji kaynaklarıyla ısıtılan akışkanın ısı enerjisi, bir ısı eşanjörü yardımıyla

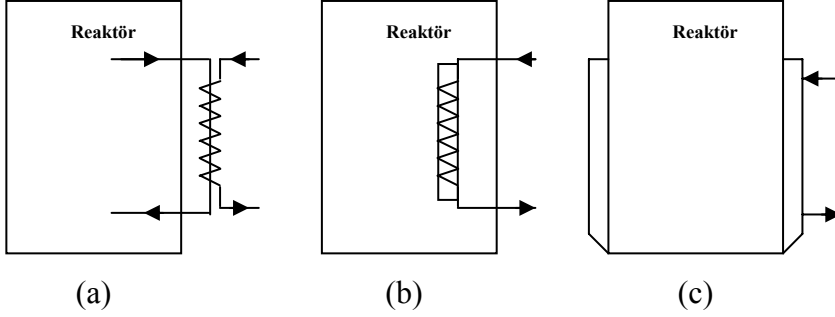
besleme materyaline veya reaktöre aktarılır (Tiwari vd., 1989; Tiwari vd., 1996). Biyogaz sistemlerinde genellikle üretilen toplam biyogazın % 20-30 kadarı, sistemin ısı ihtiyacı için kullanılır (Sasse, 1988; Koç vd., 1990; Anon., 1999e; Anon., 2000a; Bohn vd., 2007). Bu da kış aylarında net biyogaz üretiminin yaz aylarına göre yaklaşık % 30 daha az olmasına neden olmaktadır (Brule ve Sofer, 1976). Bu oran bazı sistemlerde % 40'a kadar çıkabilmektedir (Sarapatka, 1993).

Biyogaz sistemlerinde ısı ihtiyacı genellikle üç bölümde incelenebilir:

- 1- Besleme materyalinin reaktör sıcaklığına getirilmesi için gerekli olan ısı yük,
- 2- Reaktör ısı kayıpları,
- 3- Tesisattan oluşan ısı kaybı.

Tesisattan oluşan ısı kayıpları, diğerlerine göre çok düşük olduğu ve iyi bir yalıtımla önemsiz değerlere düşürülebildiği için göz ardı edilebilmektedir. Sistem boyutları büyüdükçe reaktör ısı kaybı aynı oranda artmaz. Hacim/yüzey alanı değerinin büyümesi buna neden olmaktadır (Palmer, 1981; Kishore, 1989). Isı kaybı hesaplarında, reaktör sıcaklığının görece düşük olması nedeniyle ışınlama ısı transferi göz ardı edilebilir (Stafford vd., 1981). Biyogaz sistemlerinde ısı enerjisinin büyük bölümü genellikle besleme materyalini reaktör sıcaklığına getirmek için harcanmaktadır. Bu oran toplam ısı ihtiyacının yaklaşık olarak % 70-90'ına eşittir (Anon., 1997a). Bu yüzden, boşaltılan fermente gübrenin ısısının bir eşanjör yardımıyla besleme materyaline aktarılması, sistemin ısı enerjisi tüketimini azaltır (Beba, 1988; Anon., 2002e; Zupancic ve Ros, 2003).

Şekil 2.10'da ısı aktarım şekillerine göre reaktör ısıtma sistemleri görülmektedir.



Şekil 2.10 Isı aktarım tiplerine göre reaktör ısıtma sistemleri (Demuynck vd., 1984):

a) Harici ısı eşanjörlü b) Dahili ısı eşanjörlü c) Isı ceketli

Isı kaynağından elde edilen ısı enerjisinin aktarım şekline bağlı olarak reaktörler dört grupta toplanabilmektedir:

a- Dahili Isı Eşanjörlü Reaktörler: Reaktör içinde bulunan bir ısı değiştiricisi yardımıyla ısı transferi gerçekleştirilmektedir. Bu tip sistemlerde genellikle boru tipi serpantin kullanılmaktadır. İçte kullanılan ısıtma sistemleri dış ısıtma sistemlerine, ısı kaybı minimize edildiği için tercih edilir. Dezavantajı, eşanjörde bir bozukluk olduğunda sistemin tamamen boşaltılmasını gerektirmesidir. Fakat bu durum çok nadir oluşur. En yoğun şekilde kullanılan ısıtma sistemleri bu sistemlerdir (Stafford vd., 1981; Demuynck vd., 1984; Anon., 1999c).

b- Harici Isı Eşanjörlü Reaktörler: Özellikle karıştırmanın pompa yardımıyla hidrolik olarak gerçekleştirildiği sistemlerde kullanılırlar. Sirküle edilen materyal, dışsal bir ısı eşanjöründen geçirilerek istenen sıcaklık seviyesine kadar ısıtılmaktadır. Bu sistemler genellikle TK oranının düşük olduğu reaktörlerde kullanılır. En büyük

dezavantajı, ısı eşanjörünün tıkanıklık ve verim kaybı problemleridir (Stafford vd., 1981).

c- Isı Ceketli Reaktörler: Yaygın olarak laboratuvar veya pilot ölçekli sistemlerde kullanılırlar. Bu tip reaktörlerin etrafında eşanjör görevi gören bir ısı ceketı bulunmaktadır. Isıtıcı akışkan bu ceket içerisinde sirküle edilerek ısıtma sağlanır. Pahalı olmaları önemli bir dezavantajdır (Stafford vd., 1981; Demuynck vd., 1984).

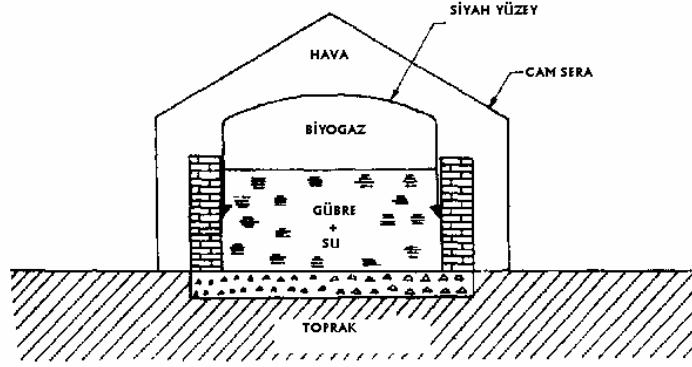
d- Buhar Enjeksiyonlu Reaktörler: Bu uygulamalara genellikle büyük ölçekli endüstriyel tip biyogaz tesislerinde rastlanmaktadır. Elde edilen buhar reaktör içine veya besleme materyaline enjekte edilerek gerekli sıcaklık sağlanmaktadır. Özellikle atık buharın bulunduğu tesislerde ekonomik olabilmektedir (Stafford vd., 1981). Buhar enjeksiyonunun sorunlarından biri, aşırı ısıtılmış bölgelerin yaratılabilmesidir (Anon., 2000c).

Reaktör içerisinde ısıtma amaçlı serpantin kullanıldığında, ısı transfer yüzeyinin mümkün olduğunca büyük tutulması gerekmektedir. Çünkü yüzey sıcaklığının 50-60 °C'yi geçmemesi gerekmektedir (Engler vd., 2002). Yüksek sıcaklıklar bakterilere zarar verebileceği gibi, yüzey üzerinde kekleşme yaratarak ısı transfer veriminin düşmesine neden olurlar. Tavsiye edilen serpantin yüzeyi, 100 m³ reaktör için yaklaşık 3,3 m²'dir (Fry, 1973). Kekklemeyi önlemenin bir yolu, ısıtma borularını reaktörün tabanına gömmektir. Fakat bu ısıtma verimini düşürür. Serpantinler yumuşak ya da paslanmaz çelikten imal edilebilirler. Toksik malzeme kullanılmaması gerekmektedir. Bu nedenle bakır serpantinler genellikle önerilmez. Fakat bazı uygulamalarda kullanılmış ve herhangi bir toksik etkisi bildirilmemiştir (Stafford vd., 1981; Arnott, 1985).

2.12 Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Sistemleri

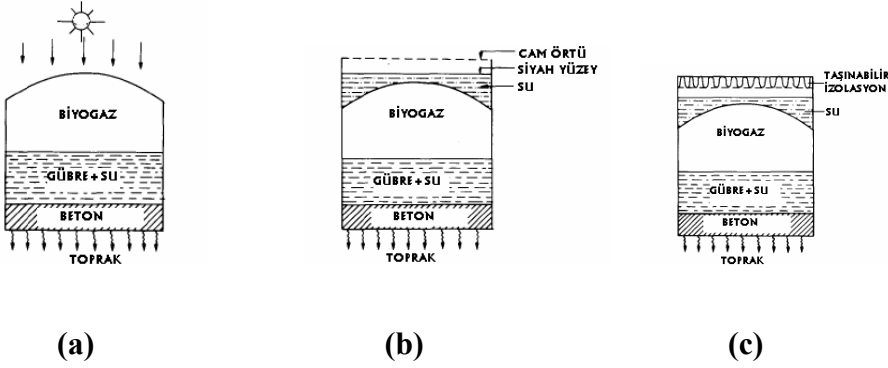
Reaktörlerin ısıtılmasında elektriğin, petrol ürünlerinin veya üretilen biyogazın kullanılması, artan ısıtma harcamalarından dolayı ekonomik olmamaktadır. Bu noktada özellikle güneş ışıını yüksek olan bölgelerde güneş enerjisi kullanılarak ısıtmanın sağlanması, sistem verimliliğini artırmaktadır (Axaopoulos vd., 2001; Koçar vd., 2007a). Türkiye 36° ve 42° kuzey enlemleri arasındadır. Yıllık ortalama günlük güneş ışıını 3,6 kWh/m² dir ve güneşlenme süresi yaklaşık 2640 saattir. Bu da güneş enerjisinden yararlanmak için oldukça iyi bir değerdir (Kaygusuz ve Kaygusuz, 2002). Türkiye ile yaklaşık aynı kuşakta bulunan Yunanistan'da yapılan çalışmalarda, güneş enerjisi destekli biyogaz sistemlerinin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Axaopoulos ve Panagakis, 2003).

Biyogaz sistemlerinde güneş enerjisinin kullanımı aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif uygulamalarda reaktörün üstü bir serayla veya güneş ışığını geçiren bir örtüyle kapatılmaktadır (Tiwari vd., 1987; Tiwari vd., 1988a; Qia vd., 2005). Reaktör yüzeyi siyah boyayla kaplanarak, gelen güneş ışıınının soğurulması sağlanmaktadır. Sera sayesinde sistem ısı kayıpları düşürülmektedir. Fakat bu uygulamalarda, reaktörden biyogazın sızması durumunda oluşabilecek tehlikeleri önlemek için seranın üstünde bir havalandırma penceresinin olması gerekmektedir (Arnott, 1985). Bu sistemlerle soğuk mevsimlerde yeterli sıcaklığa ulaşılamadığı belirtilmektedir. Özellikle dış hava sıcaklığının düştüğü ve güneş ışıınının olmadığı saatlerde, reaktör sıcaklığı önemli oranda düşmektedir. Bu sıcaklık dalgalanmalarının nedeni gelen güneş ışıınının sadece sera ortamı içerisinde bulunan hava ve gazometre tarafından depolanmasıdır. Bahsedilen sistemin şematik görünümü Şekil 2.11'de görülmektedir.



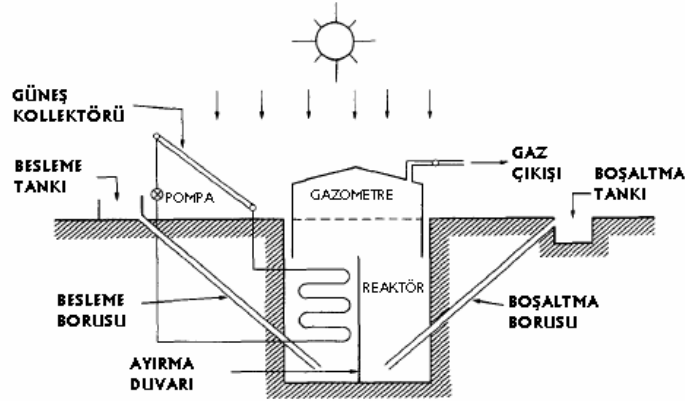
Şekil 2.11 Sera ile entegre edilmiş biyogaz sistemi (Usmani vd., 1996).

Bu sıcaklık dalgalanmalarını düşürmek amacıyla gazometrenin üzerinde, gelen güneş ışınının depolandığı su ile doldurulmuş bir haznenin bulunduğu sistemler önerilmiştir (Tiwari ve Chandra, 1986; Tiwari, 1986; Yadav vd., 1987; Tiwari vd., 1988a). Şekil 2.12’de görüleceği gibi, bu haznenin üzeri güneş ışınının soğurulduğu siyah boyalı metal bir yüzey ve cam örtüyle kapatılmıştır. Güneş ışınının olmadığı saatlerde, sistem yüzeyinden ısı kaybının azaltılması amacıyla taşınabilir izolasyon kullanılmıştır (Tiwari vd., 1996; Usmani vd., 1996). Önceki sistemde olduğu gibi bu sistemde de yardımcı ısıtıcı ve sıcaklık dalgalanmasını önleyici otomasyon sistemi bulunmamaktadır. Bu yüzden, her iki sistem de güneş enerjisiyle pasif ısıtma uygulamaları içerisinde yer almaktadır.



Şekil 2.12 Biyogaz sistemi: **(a)** Geleneksel, **(b)** Güneş ışınımının olduğu saatlerde önerilen, **(c)** Güneş ışınımının olmadığı saatlerde önerilen (Tiwari ve Chandra, 1986).

Biyogaz reaktörlerinin ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanıldığı diğer yöntem ise aktif sistemlerdir. Bu sistemlerde genellikle düzlemsel güneş kolektörlerinden yararlanılmaktadır. Elde edilen ısı enerjisi ya reaktörün ısıtılmasında kullanılır, ya da besleme materyali ısıtılarak reaktöre verilir (Tiwari vd., 1988b; Brini vd., 1994). Pasif sistemlerden ayrı olarak, bu sistemlerde sirkülasyon pompası, ısı eşanjörü ve genellikle sıcaklığı sabit tutmak amacıyla otomasyon sistemi kullanılmaktadır. Şekil 13'de reaktör ısıtılmasında güneş enerjisinden aktif olarak yararlanılan bir biyogaz sistemi görülmektedir. Şekil 2.13'den görüleceği gibi, güneş kolektöründen elde edilen ısı enerjisi bir sirkülasyon pompası ve ısı eşanjörü yardımıyla reaktöre aktarılmaktadır. Isı taşıyıcı akışkan olarak su kullanılmaktadır., ışınımın olmadığı saatlerde durdurulmaktadır. Güneş enerjisi desteğiyle çalıştırılan biyogaz sistemlerinde ısı depolama kullanılmadığında, ışınımın olmadığı zamanlarda ısı kaybını azaltmak amacıyla sirkülasyon pompası durdurulmakta ve kolektörlerle reaktör arasındaki bağlantı kesilmektedir (Gupta vd., 1988; Tiwari vd., 1989).

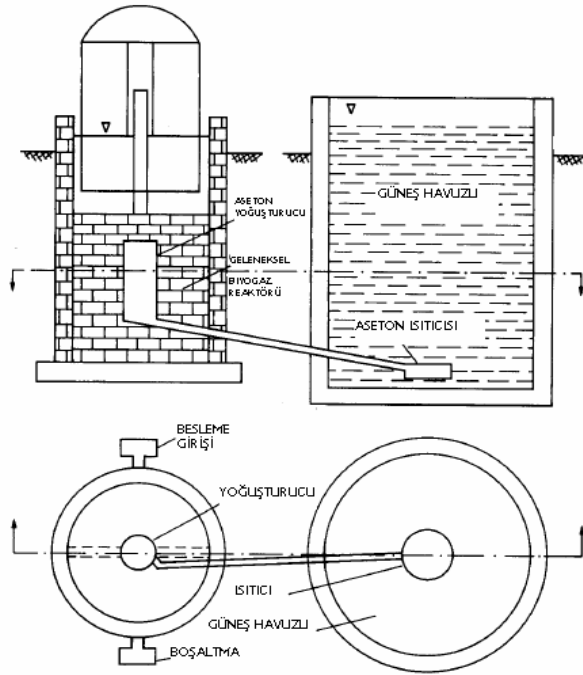


Şekil 2.13 Güneş enerjisi destekli biyogaz sistemi (Tiwari vd., 1989).

Bu sistemde sıcaklık otomasyonu, yardımcı ısıtıcı ve sıcak su akümülayon tankı kullanılmamıştır. Dolayısıyla sıcaklık dalgalanmaları söz konusudur. Daha önce belirtildiği gibi metan bakterileri ani sıcaklık değişimlerinden olumsuz yönde etkilenmekte, bu nedenle biyogaz üretim verimi düşmektedir. Fakat son yıllarda yapılan, reaktörün ısıtılmasında güneş enerjisinin aktif olarak kullanıldığı çalışmalarda, termofilik bölgede, yüksek sıcaklık değişim hızlarının geçici etkiler yarattığı ve çalışma sıcaklığına geri dönüldüğünde sistemin tekrar önceki performansına ulaştığı belirtilmektedir (El-Mashad vd., 2003; El-Mashad vd., 2004a). Güneş enerjisi desteği, küçük ölçekli biyogaz sistemlerinde önerilmekte fakat büyük sistemlerde önerilmemektedir (El-Mashad vd., 2003). Termofilik reaktörlerde güneş enerjisi desteği kullanıldığı zaman, kollektörler yüksek sıcaklıklarda (65–70 °C) çalışacağı için verimleri düşer. Bu da daha fazla kolektör alanının kullanılmasını gerektirir (Beba, 1981). Literatürde sıcaklık otomasyonunun kullanıldığı, farklı ölçekte, deneysel ve analitik çalışmalar da bulunmaktadır (Beba, 1988; Gupta vd., 1988; Tiwari vd.,

1992; Alkhamis vd., 2000; Akaopoulos vd., 2001; Kocar ve Eryasar, 2007).

Reaktör ısıtmasında güneş enerjisinden yararlanılan farklı bir sistem de, Şekil 2.14’de görülmektedir.



Şekil 2.14 Güneş havuzu destekli biyogaz sistemi (Subramanyam, 1989).

Bu sistemde güneş havuzundan yararlanılması önerilmektedir. Tuz çözeltisinin bulunduğu güneş havuzunda 100 °C sıcaklığa erişilebileceği belirtilmektedir. Bu sıcaklık seviyelerindeki akışkanın, doğrudan ısı eşanjörü yardımıyla reaktör ısıtmasında kullanılması, metan bakterileri üzerinde öldürücü etki yaratacağı için, asetonun kullanıldığı bir ısı aktarım mekanizması geliştirilmiştir. Asetonun kaynama sıcaklığı 55 °C’dir. Güneş havuzu içindeki ısıtıcı hazne içinde bulunan aseton

buharlaşmakta ve ısısını reaktör içerisindeki yoğuşturucuda sisteme aktarıp yoğuşarak ısıtma haznesine geri donmektedir. Bu evrim sayesinde reaktr ısı kayıpları karşılanmaktadır. Bu sistemde de sıcaklığın istenilen seviyede sabit kalmasını sağlayacak sıcaklık otomasyonu ve yardımcı ısıtıcı bulunmamaktadır (Subramanyam, 1989).

2.13 Biyogaz Sistemlerinin Otomasyonu

Biyogaz sistemlerinin kontrolünde sıcaklık, gaz akışı, basınç, besleme ve boşaltma miktarı, pH, reaktr sıvı seviyesi, metan oranı, metan üretim hızı, uçucu organik asit miktarındaki artış, asetik asitin organik asitler içerisindeki oranındaki artış, alkalinite duşuşu ve organik madde gideriminin miktarı parametre olarak kullanılmaktadır. Birçok ticari sistemin işletilmesinde ve stabilizasyonunun sağlanmasında, bu parametrelerin bir ya da bir kaçı llerek kontrol sağlanmaktadır. pH, sistemdeki eğilim hakkında nceden uyarı veremediği için alkalinite daha n plana çıkmaktadır (Chynoweth vd., 1994; Vanrolleghem, 1995).

Metan bakterilerinin zarar gormemesi için reaktr sıcaklığındaki değişiklikler 2 C'yi geçmemelidir (Anon., 2000a). Saatlik izin verilebilecek sıcaklık dalgalanması, psikrofilik fermentasyonda ± 2 C, mezofilik fermentasyonda ± 1 C, termofilik fermentasyonda $\pm 0,5$ C civarındadır (Anon., 1999b). Sıcaklık kontrolünde normal termostatlarla yapılan uygulamalarda 7 C sıcaklık dalgalanması olabilmektedir. PID kontrol uygulamalarında bu değer 1 C'ye kadar duşrlebilmektedir (Alkhamis vd., 2000). Bunun yanında hidrojen miktarı da sistemle ilgili bilgi vermektedir. Aşırı yikleme olduğunda metan çevrimi duşmekte ve hidrojen seviyesinde yukselme olmaktadır (Murnleitner vd., 2002). Gaz üretim miktarının takibinde ise doğal gaz için imal edilmiş ev tipi

cihazlar (kuru tip) kalibre edilerek kullanılabilir (Stafford vd., 1981).

2.14 Besleme Materyali Ön Hazırlama Prosesleri

Besleme materyalinin, reaktöre verilmeden önce anaerobik fermentasyona uygun hale getirilmesi için çeşitli ön işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Özellikle lignoselülozik yapıya sahip olan bitkisel atıklarda, fermentasyon veriminin artırılmasında ön işlemler büyük önem taşımaktadır. Anaerobik fermentasyonda fermentasyon süresinin uzamasında hidroliz aşaması belirleyici olmaktadır (Tiehm vd., 1997). Karıştırma, ısıtma, kimyasal maddeler ekleme, ses üstü dalgalar kullanma ve öğütme gibi ön işlemlerin tümü besleme materyalinin hidrolize olmasını kolaylaştırma amaçlıdır (Krich vd., 2005). Bitkisel atıklarda boyut küçültme, selülozik malzemenin yüzey alanını artırarak, fermentasyonu kolaylaştırır (Mshandetea vd., 2006). Bitkisel atıklar genellikle 2-6 cm olacak şekilde parçalanarak kullanılırlar (Werner vd., 1989). Yapılan çalışmalarda 0,4 mm ve altında küçültmenin fermentasyon hızını çok fazla değiştirmedeği, bu yüzden teknik alt değer 0,4 mm olduğu belirtilmiştir (Sharma vd., 1988). Ticari uygulamalarda, parça boyutunda ekonomik alt değer 1 mm olarak verilmektedir (Gunaseelan, 1997). Hidroliz süresinin kısaltılmasında yüksek frekanslı ses dalgaları kullanılabilir. Aktif çamurunun hammadde olarak kullanıldığı bir çalışmada, bu yöntemin kullanıldığı reaktörlerde kontrol reaktörüne göre 2,2 kat daha fazla biyogaz üretim değerlerine ulaşılmıştır (Tiehm vd., 1997). Besleme materyalinin anaerobik fermentasyondan önce, yüksek frekanslı ses dalgalarıyla veya γ -ışınımı ile ön işleme tabi tutulduğu, böylece kümeleşmiş yapıların dağılması ve karbonhidratların ve organik maddelerin çözünabilirliğinin artırıldığı, bu yolla gaz veriminin artırıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

(Lafitte-Trouque ve Forster, 2002). Ön işlemten geçirilerek kolay fermente olmayan maddelerin içerisinde uzaklaştırıldığı hayvansal atıklarla yapılan denemelerde, metan üretiminin ikiye katlandığı belirtilmektedir (Lo ve Liao, 1985). Yemekhane atıklarının kullanılması durumunda da, toplanan materyallerin parçalanması gerekmektedir (Nand vd., 1991). Ön hazırlama işlemlerinden biri de termal hidrolizdir. Bu yöntemde hammadde reaktöre verilmeden önce 120–180 °C arasındaki sıcaklıkta yaklaşık 30 dakika tutulmakta ve biyogaz veriminin artması sağlanmaktadır (Machenbach, 1999).

2.15 Biyogazın Kullanım Alanları

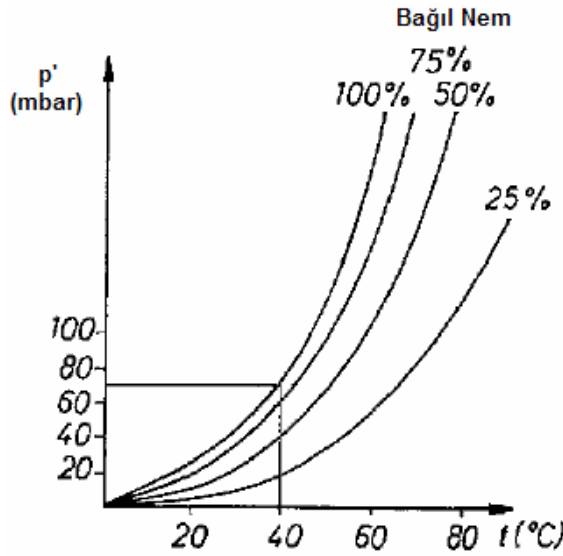
Biyogazın alt ısı değeri, içerdiği CH₄ oranına bağlı olarak yaklaşık 20-27 MJ/m³ arasında değişmektedir (Stafford vd., 1981; Mitzlaff, 1988; Gustavsson, 2000). Metanın standart basınç ve sıcaklıkta (1013 mbar – 0 °C) alt ısı değeri, H_{a,n}= 36 MJ/m³, yoğunluğu, $\rho = 0,72 \text{ kg/m}^3$ dür. Yine kütsel olarak alt ısı değeri H_{a,m}=50 MJ/kg'dır. Biyogazın kalorifik değeri hesaplanırken sıcaklık ve basınç düzeltmeleri yapılır. Düzeltilmiş yoğunluk ρ_2 (kg/m³) sıcaklığa ve basınca göre,

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \quad (2.7)$$

formülünden bulunur. Burada T_1 , P_1 ve ρ_1 sırasıyla metanın STP'de sıcaklık (°C), basınç (mbar) ve yoğunluğudur (kg/m³). T_2 ve P_2 ise ölçülen sıcaklık (°C) ve basınç (mbar) değerleridir. Buradan elde edilen düzeltilmiş yoğunluk kullanılarak, biyogazın alt ısı değeri $H_{a,n}$ (kJ/m³),

$$H_{a,n} = \frac{V_{CH_4}}{V_T} \cdot \rho_2 \cdot H_{a,m} \quad (2.8)$$

formülüyle bulunur. Burada V_T (m^3) ve V_{CH_4} (m^3) sırasıyla biyogazın toplam hacmi ve CH_4 'ı biyogaz içerisinde kapladığı hacimdir. $H_{a,m}$ (kJ/kg) CH_4 'ın kütsel olarak alt ısı değeri. Genelde biyogazın içerdiği su buharı dikkate alınmaz. Fakat (2.7) nolu formüldeki basınç değerinin su buharına göre düzeltilmesi gerekir. Bu amaçla Şekil 2.15'de görülen grafik kullanılır.



Şekil 2.15 Biyogaz içerisinde bulunan su buharının bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak kısmi basınç değişimi.

Şekil 2.15'de en çok çalışılan mezofilik bölge sıcaklığı olan 37 °C için su buharının kısmi basıncı gösterilmiştir. Bağıl nem biyogaz su buharına doymuş olduğu için % 100 alınmıştır. Buradan elde edilen kısmi basınç değeri, p' (mbar),

$$p_d = p_t - p' \quad (2.9)$$

formülünde yerine konularak düzeltilmiş basınç p_d (mbar) elde edilir. Burada p_t (mbar) biyogazın toplam basıncıdır. Elde edilen düzeltilmiş basınç değeri (2.7) formülünde kullanılarak metanın gerçek yoğunluk değerine ulaşılır ve (2.8) formülüyle biyogazın alt ısı değeri hesaplanır (Mitzlaff, 1988).

Biyogaz doğrudan yakılarak, sıcak su ve sıcak hava elde etmede, kurutmada, buhar elde ederek ısı ve güç üretiminde kullanılabilir. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılarak, mekanik iş ve elektrik elde edilebilir (Kocar vd., 2007). Diğer bir kullanım alanı ise absorpsiyonlu ısıtma ve soğutmadır. Gaz türbinlerinde kullanım ise içerdiği su buharının ve diğer kalıntı gazların tamamen giderilmesini gerektirmektedir (Walsh vd., 1989). Özellikle elektrik bulunmayan kırsal kesimlere sahip ülkelerde, küçük ölçekli çiftliklerde biyogaz doğrudan yakılarak aydınlatma amaçlı olarak da kullanılabilir (Jash ve Basu, 1999). Biyogazın kurutmada ve özellikle kuluçka makinasında kullanımı durumunda sistem yatırımının geri ödeme süresi düşmektedir (Jiang vd., 1987). Elde edilen fermente gübre sistemde önem taşıdığına, bu atığın kurutulması veya sterilize edilmesi için biyogazın kullanılması ekonomik olmaktadır (Stafford vd., 1981).

Biyogazın, LPG ve doğal gazla çalışan cihazlarda kullanılabilmesi için çeşitli modifikasyonlar gereklidir. Primer hava girişinin ve yanma hızının ayarlanması bunlardan biridir. Biyogaz, doğal gaz ya da LPG ile çalışan cihazlarda kullanıldığında, meme çapı büyütülmeli, hava giriş portu küçültülmelidir. Meme çapı, doğal gazla çalışanlara göre yaklaşık 1,3 kat artırılmalıdır (Mears, 2001). Primer havanın düşmesiyle alev stabil hale gelir. Ayrıca brülörün başına bir metal elek eklenerek, alevin

çarpma etkisi artırılır ve daha verimli yanma sağlanır (Jiang vd., 1987). Biyogazın yanması için litre başına 5,1 l hava gerekirken bu propan için 23,8 l butan için 30,9 l olmaktadır (Sasse vd., 1991). Biyogaz genellikle büyük alev jeti ve düşük yanma hızında kullanılır. Gerekli basınç bu durumda 10-15 mbar civarındadır. Uygun yanma hızı genellikle 0,25 – 0,34 m/s olarak verilmektedir. Biyogazın içerisindeki CO₂ gazı, yanma ve alev yayılma hızını düşürür (Jenangi, 1981; Winfield, 1986; Walsh vd., 1989; Hudson vd., 2001; Porpatham vd., 2007). Biyogazı doğrudan yakan kazanlarda 1000 ppm'e kadar H₂S kabul edilebilir. Kazanlarda kullanım sırasında, biyogaz içerisinde bulunan nemin giderilmesi, gaz memelerinde oluşacak problemlerin engellenmesini sağlar. Bu giderim sırasında, H₂S'in büyük oranda giderilmesi de sağlanmış olur (Aoki vd., 2006). Biyogazla çalışan cihazların, yoğunlaşmayı ve sülfürik asit oluşumunu önleyecek sıcaklıklarda çalıştırılması gerekmektedir (Leggett vd., 2002).

Petrol ürünleriyle çalışan tüm içten yanmalı motorlarda biyogaz kullanılabilir. Dizel motorlarda, karbüratörde % 10-30 motorin ve biyogaz karışımının sağlanması gerekmektedir (Jenangi, 1981). Biyogaz içten yanmalı motorlarda kullanıldığında elektrik elde edilebildiği gibi, su pompalama gibi sistemlerde de mekanik tahrik olarak kullanılabilir (Purohit ve Kandpal, 2007). Fakat motorların biyogaz sistemine uzak kalması ve sistemlerde kullanılan gaz depolama ünitelerinin küçük olması bu kullanımı zorlaştırmaktadır (Gustavsson, 2000). İçten yanmalı motorlarda 1 kWh enerji için yaklaşık 0,45-0,8 m³ biyogaza ihtiyaç vardır (Werner vd., 1989). Biyogazın yakıt olarak yüksek basınçta depolandığı ve içten yanmalı motorlarda kullanıldığı uygulamalarda, güvenlik nedeniyle sistemde emniyet vanası, hızlı kapama vanası, çift cidarlı gaz borusu, ek pompa muhafazası, gaz kontrol

pompası, gaz vanası kullanılmalıdır. Biyogaz hareketli ve sabit tarımsal makinalarda kullanılabilir (Bayhan ve Zablocki, 1991).

Düzgün ekipmanların kullanılması ve yakıt-hava karışımının doğru olarak ayarlanması durumunda, biyogaz kullanımı motorun aşınmasını ve bakım giderlerini diğer konvensiyonel sıvı yakıtlara göre düşürmektedir (Bayhan ve Zablocki, 1991). Biyogazın içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımındaki avantajlar, tam yanma, yağlama yağlarının özelliklerini bozmama ve vuruntuya neden olmamaktır (Cheng-qui vd., 1989). Üretici firmalar, biyogazın benzinli motorlarda kullanımında, haftada bir kere yağ ve filtre değiştirilmesini önermektedirler. CO₂'si giderilmiş biyogaz, yüksek oktan oranıyla, içten yanmalı motorlar için uygundur. Silindirlerde ve pistonlarda, karbon atıklarına neden olmaz. Kalıntıya neden olmadığı için yağ değiştirme süreleri uzar. Yağı sıvı yakıtların kullanımında olduğu gibi seyreltmediği için motor ömrünü uzatır. İçerisinde tetra etil bulunmadığı için havayı kirletmez. Benzine göre havayla daha iyi karıştığından, daha kaliteli ve temiz yanma sağlar (Jewell vd., 1986). Metan kullanılan içten yanmalı motorlarda bakım giderleri dizel kullananlara göre % 40-50 düşmektedir (Anon., 2000h). Fakat bazı çalışmalarda, yüzeylerde karbon birikmesi ve yağ asitliğinin artması gibi sorunlar rapor edilmiştir (Pelerin vd., 1988).

İçten yanmalı motorlarda, düzensiz yanma ve basınç artışlarına vuruntulu yanma adı verilmektedir. Benzin ve dizel gibi sıvı yakıtları kalitelerine göre sınıflandırabilmek ve vuruntu eğilimini belirlemek için başvuru oktan ve setan sayıları yanında, gaz yakıtlarda da metan sayısı kullanılmaktadır (Henham ve Makkar, 1998). Metan ve biyogaz vuruntuya karşı dirençlidir. Metanın oktan sayısı 120'dir. İçerdiği CO₂ nedeniyle biyogazın ise 100'ün biraz üzerindedir ve yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabilir. Benzinde bu oran 89-98 arasında değişmektedir

(Jewell vd., 1986). Bütanın metan sayısı 10 iken metanın 100, % 70 metana sahip biyogazın 130 olmaktadır. Tam yanma için gerekli hava miktarı 1 kg CH₄ için 14,5 kg havadır (Mitzlaff, 1988). Biyogaz kullanımı benzinli motorda yaklaşık olarak % 15–20 güç düşümüne sebep olur. Doğal gaz ve arıtılmış biyogaz için bu güç düşümü % 10, LPG için % 5 civarındadır (Jewell vd., 1986; Mitzlaff, 1988). Araştırmalarda, benzinli motorlarda biyogaz kullanıldığında, sıkıştırma oranının 1:4 – 1:16 arasında değiştirilebildiği görülmüştür. Yanma, ölü noktaya % 30 kala başlatılır. Hava yakıt oranı 1:10'dur. Biyogaz, yağlama sorunu yüzünden, iki zamanlı motorlarda kullanıma uygun değildir fakat kullanılmaktadır. Biyogaz dizel motorlarda kullanım için oldukça elverişlidir. Genellikle motorinle birlikte kullanılır. Dizel motorlarda kullanımda, yüksek sıkıştırma oranına bağlı olarak daha yüksek verim alınabilmektedir. Yüksek sıkıştırma oranı verimi artırırken, motor ömrünü de gerilimden dolayı düşürür. Ayrıca sıkıştırma oranının düşürülmesi, NO_x emisyonunu azaltırken performansı düşürür. Bu performans düşüşünü engellemek için motor ön yanma odalı olarak oluşturulur (Roubaud ve Favrat, 2005). Besleme materyaline bağlı olarak biyogaz içerisinde amonyak miktarı 450 ppm'e kadar çıkabilmektedir. Bu amonyak içten yanmalı motorlarda NO_x emisyonunun artmasına neden olur. Ayrıca yakıt hücrelerinde kullanımda sistem ömrünün azalmasına neden olur. Bu nedenle özellikle azot yönünden zengin hammaddelerin kullanıldığı durumlarda serbest amonyak miktarının izlenmesi gereklidir (Gustavsson, 2000). Biyogazla çalıştırılan içten yanmalı motorlarda hava-yakıt oranı artırıldığında NO_x ve CO emisyonları düşürülmekte, fakat verim azalmaktadır (Amon vd., 2003). Biyogazın içerisinde CO₂ bulunması nedeniyle motor performansı düşmekte fakat NO_x emisyonu azalmaktadır (Crookes, 2006). CO emisyonu daha yüksektir ve biyogaz içerisinde H₂S bulunması yüzünden katalizör kullanarak bu emisyonu düşürmek zordur. Fakat CO, NO_x'e

göre daha problemsiz bir gazdır. Çünkü çok hızlı bir şekilde okside olarak CO_2 'e dönüşür ve doğal karbon çevrimine dahil olur (Anon., 1999a). Bu motorlarda, yağ değişimi için pH değerine bakılır. Kullanılan yağın hızlı bir şekilde asitide olması, H_2S 'in yüksek oranda olduğu ve arıtılması gerektiği anlamına gelmektedir. Biyogazın motor performansına etkileri, motor test dinamometresi yoluyla bulunur. Biyogaz içerdiği CO_2 'in tamponlama etkisi ile dizel motorlardaki vuruntu sesini önlemektedir. Enjektörde oluşabilecek sorunları engellemek için biyogazla karışımda motorinin alt oranı, yaklaşık % 20 olmalıdır (Arnott, 1985). İçten yanmalı motorların kullanıldığı kojenerasyon tesislerinde de H_2S seviyesi 700-1000 ppm'den düşük olmalıdır (Aoki vd., 2006). Benzinli motorlar, dizel motorlara göre H_2S 'e karşı daha hassastır (Anon., 1999a). Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımında, üretici firmalar H_2S oranının 10 ppm'in altında, egzoz sıcaklığının ise yoğunlaşma olmaması için, 88 °C'nin üzerinde tutulmasını önermektedirler (Arnott, 1985). Biyogaz kullanıldığında % 10 civarında H_2 eklenmesi, yanma oranını artırmakta ve bu yüzden hidrokarbon emisyonunu düşürerek motor performansını artırmaktadır (Porpatham vd., 2007). Durma ve kalkma sırasında düşük sıcaklıklar nedeniyle oluşabilecek yoğunlaşmanın, gaz içerisindeki koroziv bileşikler nedeniyle oluşturacağı korozyonu engellemek için, motor durdurulduğunda ya da biyogaz bittiğinde, bir dakika süresince diğer bir yakıtın kullanılması bir çözümdür (Piccinini vd., 1996).

Taşımacılıkta biyogazın yakıt olarak kullanımı, İsveç şartlarında araştırılmış ve özellikle kırsal kesim için ekonomik olarak diğer yakıtlara alternatif olabileceği bulunmuştur (Johansson, 1999). Taşıtlarda kullanım, doğal gazla çalışan motorlarda mümkündür. Bu tip kullanımda biyogazın arıtılması gerekmektedir. Bunun nedenleri;

- Alt ısııl değerin yüksek olmasıyla daha uzun mesafelerin gidilebilmesi,
- Güvenli sürüş için düzenli ve sabit gaz kalitesinin gerekli olması,
- H_2S , amonyak ve suyun yüksek seviyede olması yüzünden oluşabilecek koroziyon etkiden kaçınılabilmesi,
- Mekanik arızaya neden olabilecek partiküllerin olmaması,
- Gaz içerisinde bulunan su yüzünden oluşabilecek buzlanma nedeniyle ortaya çıkan tıkanıklıkların önüne geçilmesi,
- Gaz kalitesinin tanımlanması ve güvenceye alınmasıdır.

Uygulamalarda genellikle, metan oranının % 95 üzerinde olduğu arıtım sistemleri kullanılmaktadır (Anon., 1999a). Avrupada 1996 yılında başlatılıp 2000 yılında tamamlanan ZEUS (Zero and Low Emission Vehicles in Urban Society) projesi kapsamında, kanola metil esteri (biyodizel), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), elektrik ve etanol kullanan araçların yanısıra biyogaz ile çalışan 3'ü kamyon, 45'i minibüs ve geri kalanı otomobil olmak üzere 223 araç faaliyete geçmiştir (Anon., 2000i).

Biyogaz reformasyonla yakıt hücrelerinde ya da arıtılarak mikrotürbinlerde kullanılabilir. Biyogazın stirling motorunda kullanımı 1–10 kW gibi düşük kapasitelerde mümkündür ve bu motorlar dıştan yanmalı olduğu için korozyona daha dayanıklıdır. Ayrıca düşük yüklerde yüksek verim alınabilmektedir (Mears, 2001; Van Herle vd., 2003; Kartha vd., 2005). Gaz türbinleri yüksek verimli ve sağlam uygulamalardır, fakat yaklaşık 800 kW_e ve üzerindeki uygulamalarda kullanılabilirler (Anon., 1999a). Düşük güçlerde mikrotürbinler kullanılmaktadır. Mikrotürbinler, jet motoru entegre edilmiş elektrik

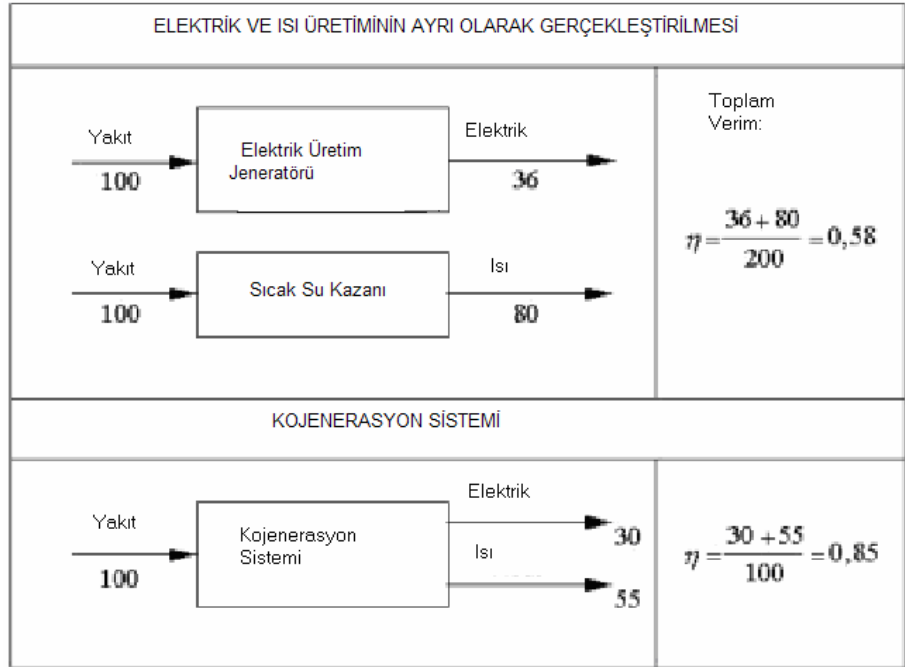
jeneratörleridir ve bu uygulamalarda atık ısıdan da faydalanılmaktadır. Elektrik çevrim verimleri % 27 civarındadır (Mehta, 2002).

Konvensiyonel sobalarda % 8-22 civarında olan ısı verim biyogaz sobalarında yaklaşık % 45'dir (Painuly vd., 1995; Gustavsson, 2000). Örneğin sığır atığının tezek olarak yakılmasında termal verim % 10'un altındadır (Bala ve Satter, 1991; El-Shimi ve Arafa, 1997). Oysa bu atıktan elde edilen biyogazın kullanıldığı özel tasarımı ocaklarda verim % 55-65'e kadar çıkarılabilmektedir (Kishore vd., 1987; Bhattacharya ve Salam, 2002). Biyogaz ocaklarında gaz harcaması yaklaşık 200-900 l/saat arasında değişmektedir (Gustavsson, 2000). Gerekli gaz giriş basıncı 5-20 mbar'dır. Lambalarda bu basınç 10 mbar civarındadır (Sasse, 1988). Motorinle beraber biyogazın kullanıldığı çift yakıtlı dizel motorların elektrik çevrim verimleri diğerlerine göre daha yüksektir. Ateşlemeli motorlarda % 24-29, çift yakıtlı uygulamalarda % 31 olan elektrik çevrim verimi büyük kapasiteli (600-1000 kW) jeneratörlerde % 38-40'a kadar yükseltilebilmektedir (Tafdrup, 1995; Lusk, 1998; Anon., 1999a; Anon., 1999c). Biyogazla çalışan lambaların verimi % 3'dür. 60 watt gücündeki biyogaz lambaları, yaklaşık 0,11-0,15 m³/h yakıt tüketmektedir (Vijayalekshmy, 1985). Bu yüzden biyogazın yakılarak aydınlatmada kullanılması verimsizdir. 1 m³ biyogazdan elde edilen elektrik enerjisiyle 60 watt gücündeki lambalardan 25 adeti 1 saat çalıştırılabilirken, yakılması durumunda aynı güçte 7 adet gaz lambası ancak çalıştırılabilmektedir (Dutt ve Mills, 1994). Radyant sobalarda, seramik kütle 600 - 800 °C'de ısı yaymaya başlar. Bu ısıtıcılarda verim % 95 civarındadır. Bu ısıtıcıların çalışma basıncı 20-80 mbar arasındadır ve biyogaz tüketimleri yaklaşık saatte 200-300 litredir (Anon., 1999b).

Biyogazın ısıtma cihazlarında kullanımı diğerlerine göre daha verimlidir. Fakat yaz aylarında kullanılamaması dezavantajlardan biridir.

Bu nedenle biyogazın soğutma tesislerinde kullanımı bir çözüm olmaktadır. Özellikle süt üretiminde kullanılan elektriğin yaklaşık olarak % 15-30'u sütün soğutulmasına harcanmaktadır. Fakat kompresörlerde biyogazın kullanımı, gaz tahrikli motorların pahalı olması nedeniyle ekonomik olmamaktadır (Anon., 2000j; Krich vd., 2005). Bu durumda absorpsiyonlu soğutma sistemlerini kullanmak mümkündür. Fakat bu sistemlerin yatırım maliyetleri yüksektir (Leggett vd., 2002). LiBr-H₂O çevrimi özellikle ortam iklimlendirilmesinde en uygun sistemdir (Siddiqui, 1991a; Siddiqui, 1991b). Küçük ölçekli absorpsiyonlu soğutucularda verim % 1,5–4 arasındadır. Saatlik biyogaz ihtiyacı, 40 °C ortam sıcaklığında yaklaşık olarak 0,3–0,8 l/l soğutma hacmi olmaktadır. Bu da 100 lt hacimli bir soğutucunun günde yaklaşık olarak 2 m³ biyogaz harcaması demektir (Werner vd., 1989; Anon., 1999b). Biyogazın absorpsiyonlu soğutma çevrimli buzdolaplarında kullanımında, pilot alevin sönmesi en önemli sorunu oluşturmaktadır (Arnott, 1985).

Biyogazla çalışan elektrik jeneratörlerinde, kullanılan yakıtın enerjisinin yaklaşık % 75'i atık ısı olarak kaybedilmektedir (Anon., 2000b; Anon., 2000j). Bu atık ısının da kullanıldığı modern kojenerasyon sistemlerinde, toplam sistem verimi yaklaşık % 85-90 olarak gerçekleşmektedir (Anon., 1999c; Anon., 1999f). Elektrik çevrim veriminin % 36 gibi yüksek, yakma veriminin % 80 alındığı ayırık sistemlerle karşılaştırıldığında, elektrik çevrim verimi % 30, ısı çevrim verimi % 55 olan kojenerasyon sistemlerinin toplam verimi, % 58'den % 85'e çıkmaktadır. Bu verim artışının şematik gösterimi Şekil 2.16'da verilmiştir (Anon., 2001c).



Şekil 2.16 Konvansiyonel elektrik ve ısı üretimi ile kojenerasyon ünitelerinin verimlerinin karşılaştırılması.

Güç üretimi ve ısı enerjisi kullanımı yanında soğutma da sisteme entegre edildiğinde trijenerasyon üniteleri ortaya çıkmaktadır. Trijenerasyon sayesinde özellikle ısı enerjisi ihtiyacının düşük olduğu, soğutma ihtiyacının yüksek olduğu yaz aylarında sistem daha verimli kullanılabilmekte ve toplam verim artmaktadır (Chevalier ve Meunier, 2005).

Biyogaz yakıt hücrelerinde reformasyonla hidrojene dönüştürülerek kullanılabilir. Yakıt hücrelerinin elektrik çevrim verimleri % 50 seviyesindedir. CO₂ den daha çok H₂S ve halojenlerin giderilmesi önemlidir (Anon., 1999a; Spiegel ve Preston, 2000). Biyogazın reformasyonu buharla ve kuru olarak iki şekilde

gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen H_2 ve CO ise Fischer-Trops sentezi prosesi ile sıvı hidrokarbonlara çevrilebilmektedir. Metanol bunlardan biridir (Chacravarthi, 1998; Ho, 2001; Ebbeson vd., 2002; Krich vd., 2005). Dizel yakıt yerine kullanılabilen dimetil eter (DME) de bu gazdan sentezlenebilir. DME normal atmosfer basıncı ve sıcaklığında gaz halindedir ve sıvılaştırılması için $-25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye soğutulması ya da 6 bar basınca sıkıştırılması gerekmektedir (Komiya vd., 2006). Biyogazın Fosforik Asit Yakıt Hücresi başta olmak üzere Molten Karbonat ve Solid Oksit Yakıt hücrelerinde kullanımı denenmektedir. Kullanımdan önce biyogazın içerdiği halojenlerin, su buharının ve parçacıkların giderilmesi gerekmektedir. Özellikle H_2S 'in giderimi önemlidir (Dayton, 2001; Sasaki vd., 2004; Troglisch vd., 2005). Molten karbonat ve Solid Oksit Yakıt hücrelerinin, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle biyogaz için daha uygun oldukları belirtilmektedir (Bove ve Lunghi, 2005; Krumbeck vd., 2006). Yüksek sıcaklıklı yakıt hücreleri kullanılarak biyogazdan elektrik üretildiğinde, elektrik çevrim verimi yaklaşık % 50-60 olmakta, ayrıca atık ısı enerjisi, $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi yüksek sıcaklık nedeniyle buhar üretimi gibi proselerde kullanılabilirdiği gibi fermente atığın kurutulmasında da bu ısı enerjisinden yararlanılabilmektedir (Krumbeck vd., 2006).

Üretilen biyogazın kullanılmadığı durumlarda, depolama yetersiz kaldığı zaman, fazla biyogazın yakılarak atılması gerekmektedir. Bunun için büyük tesislerde özel biyogaz yakıcıları kullanılmaktadır. Bu yakıcılar açık ve kapalı olmak üzere iki çeşittir. Kapalı tipler daha pahalı olmasına rağmen emisyon kontrolünü mümkün kılmaktadır. Bu yakıcılarda, istenilmeyen emisyon değerlerinden kaçınabilmek için, alev sıcaklığının $850-1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve bekletme süresinin minimum 0,3 saniye olması gerekmektedir (Anon., 2000d). Kullanım fazlalığından oluşan kayıplar % 40 civarındadır. Bu yüzden biyogazın arıtılarak doğal gaz

hattına verilmesi daha verimli olmaktadır (Tentscher, 2002). Biyogazın, artırılarak doğalgaz boru hattına verilmeden önce, kokulandırılması, H_2S oranının 2,7 ppm'in, su buharının 0,1 mgr'ın altına düşürülmesi gerekmektedir (Walsh vd., 1989; Hagen vd., 2001).

2.16 Fermente Gübrenin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Anaerobik fermentasyondan sonra geriye kalan atık, organik gübre olarak adlandırılır. Biyogaz tesislerinin birincil ürünü organik gübredir. Beslemede kullanılan materyalin katı maddesinin yaklaşık % 70'ini oluşturan elementler, içerdikleri maddelere bağlı olarak, fermentasyondan sonra miktarları ve yapıları değişmeden kalırlar. Besleme materyali içerisinde bulunan karbon, oksijen ve hidrojen, anaerobik fermentasyon sırasında, metan ve karbondioksit formunda kaybedilir. Diğer besinler ve elementler korunur. Hammaddenin mineral ve besleyici yapısı önemli bir değişikliğe uğramaz. Taze atığa göre içerisinde azot, potasyum ve fosfor, bitkilerin kolaylıkla kullanabileceği formda bulunur. Amino-asitler ve proteinler, amonyak ve çözünmüş amonyum bileşenlerine dönüşür. Azot başlıca amonyum formundadır. Anaerobik fermentasyon sırasında gaz halindeki azot amonyağa dönüşür. Anaerobik fermentasyon sonrasında % 50 organik, % 50 mineral azot elde edilir. Mineral azot bitkilerin direkt kullanabileceği bir yapıdır. Ayrıca ölmüş olan bakteriler de fermente gübrenin organik kısmını artırır. Bu fermentasyon prosesine ve hammaddenin özelliklerine göre değişir (Arnott, 1985; Sasse, 1988; Anon., 1999c; Gustavsson, 2000; Boyd, 2000; Anon., 2000a).

Fermente gübrenin içeriği, kullanılan hammaddeye göre değişkenlik gösterir. Sadece hayvan atığı kullanıldığında, fosfor içeriği, potasyum ve azot içeriğine göre daha azalır. Uygulama yapılacak

toprağın yapısı ve yetiştirilecek bitkinin türüne göre besin elementi gereksinimleri göz önüne alınarak, kimyasal gübre eklemesiyle uygulamak daha olumlu sonuçlar verir. Anaerobik fermentasyon C/N oranını düşürmekte, bu yüzden gübre değerini artırmaktadır. Katı fermente gübrenin C/N oranı yaklaşık 13 dür ve tarımsal uygulamalara uygundur. Fermente gübre toprağın fiziksel özelliklerinin ve su tutma kapasitesini iyileştirir, havalanmasını sağlar, pH tamponlama kapasitesini artırır. İnorganik toprak elementleriyle birleşerek, onların süzülme yoluyla kaybını engeller, bitkilerin kullanımı için serbest bırakır. Toprak erozyonunu engeller. Fermente gübre, azot, fosfor ve potasyumun yanında, kalsiyum, magnezyum, sülfür, bakır, manganez ve çinko gibi temel iz elementleri de içerir. Fermente olmuş gübrenin kokusu azalmakta, sinek oluşumu kaybolmaktadır. Patojen ve yumurta giderimi yaklaşık % 95 oranında gerçekleşmekte, zararlı ot tohumları işlevlerini kaybetmektedir. Fermente gübrede azot kaybı, aerobik kompostlamaya göre % 25–60 oranında azalmaktadır (Arnott, 1985; Bolu, 1987; Werner vd., 1989). Fermente gübrede fosfor/potasyum oranı yaklaşık 1:3'dür. Bu oran buğday ve kolza gibi bitkilerin gelişimi için uygun bir orandır (Birkmose, 2002). Anaerobik fermentasyon sırasında bitkiler üzerinde toksik etki yapan asitler azalmaktadır (Klingler, 2000). Ham hayvan atığına göre fermente atıkta besin maddeleri daha homojen bir şekilde dağılmaktadır (Ernst vd., 1999).

Toprağın üst tabakası, bitkilerin gelişmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tabakayı korumakta inorganik gübreler yeterli olmamaktadır. Hatta toprak erozyonuna sebep olmaktadır. Bu yüzden besleyici maddesi yüksek olan organik gübre, kimyasal gübreye göre daha avantajlıdır. Fermente gübre sadece besleyici olması nedeniyle değil, lifli yapılar içermesi sayesinde erozyonu önlediği için avantajlıdır. Fermente gübre NPK yönünden komposta göre daha değerlidir. Yapılan

çalışmalarda, azot yönünden fermente gübrenin kompost gübreye göre yaklaşık olarak üç kat daha zengin olduğu belirtilmektedir (Arnott, 1985). Fermente gübre içerisindeki besin maddeleri, toprak içindeki bakterilerin gelişmesini sağlar ve toprağın yapısının düzelmesine neden olur. Fakat çok ve sık kullanıldığında, ürünün gelişmesini engellemekte ve yüzeyde kaymak tabakasının oluşmasına neden olmaktadır. Fermente gübrenin reaktörden çıkar çıkmaz kullanımında, içerisinde çözünmüş olarak bulunan H_2S nedeniyle, çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir. Bu yüzden, fermente gübreyi 15–30 gün civarında açık havada bekletmek bu sorunu, oksidasyon nedeniyle engeller (Arnott, 1985). Bir çalışmada kimyasal gübrenin etkisinin bir yıl sürerken, fermente gübrenin etkisinin üç yıl sürdüğü belirtilmektedir. Kimyasal gübre kullanımının dezavantajlarından biri de, artık kimyasal maddelerin yer altı suyu ve nehirlerle karışarak kirlilik yaratmasıdır. Fakat bu uzun süreli kötü etkiler, hızlı ürün gelişimi yüzünden gölgelenmektedir ve kimyasal gübre kullanımı devam etmektedir (Arnott, 1985).

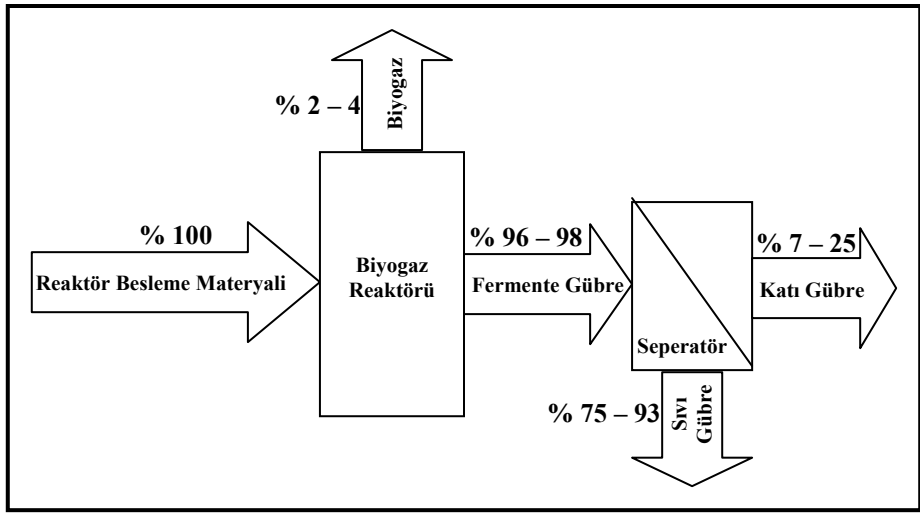
Fermentasyon öncesi besleme materyaline göre fermente gübre daha akışkan ve homojen bir yapıya sahiptir. Fermente gübre toprağın su tutma kapasitesini çoğaltmaktadır. Fakat su dengesinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Su azlığında gübre özelliği azalmaktadır. Prosesden sonra fermente gübrenin saklama koşulları, verimi etkileyen bir faktördür. Azot kaybını önlemek için fermente gübre kapalı bir depoda saklanmalıdır. Fermente gübre atmosfere açık bir şekilde depolanırsa ya da kurutulursa amonyak buharlaşmasıyla yaklaşık olarak toplam azotunun % 50'sini, inorganik azotunun ise % 90'ını kaybeder. Böylece gübre değerinde azalma olur. Bunu engellemek için yüzeyde örtü meydana getirerek atmosferle teması azaltan, yüzücü, kesilmiş saman gibi malzemeler kullanılmaktadır. Ya da fermente gübre diğer organik materyallerle kompostlanmaktadır. Bu durumda azot kaybı engellenir ve taşıma

kolaylaşır. Eğer bitki atıklarıyla fermente gübre karıştırılarak kompostlanırsa azot kaybı yaklaşık % 30–70 civarında azaltılır. Ayrıca bekletme sırasında havasız ortamda bakteriler denitrifikasyon gerçekleştirir. Sulama kanalı uygunsa, fermente gübrenin bu yolla tarlaya verilmesi, azot kaybının azaltılması yönünden daha uygundur. Sıvı halde toprak altına enjekte etmek de bu kaybın azalmasını sağlamaktadır (Arnott, 1985; Werner vd., 1989; Anon., 1999c; Anon., 2000f; Gustavsson, 2000; Matsunaka vd., 2006).

Fermente gübrenin bir kullanım şekli de kuru ya da yeşil yapraklardan bir filtre–yatağa sahip bir çukura konularak, alttan süzülen suyun reaktör besleme materyalinde tekrar kullanılması ve yukarıda kalan kuru maddenin kullanım için saklanması yöntemidir. Bu fermente gübre yoğun şekilde bakteri içerir ve bitkisel maddelerin kompostlanması için elverişlidir. Anaerobik fermentasyon sırasında besin değeri kaybolmaz ve özellikle B12 vitamini bu sürede sentezlenir. Protein yönünden zengindir. Bu materyal güneş altında ya da bir kurutucuda kurutulur. Bu tip kullanımda, üretilen biyogazdan yararlanarak fermente gübrenin kurutulması toplam sistem verimini artırmaktadır (Jiang vd., 1987). Fakat vitamin yapısının bozulmaması için yüksek sıcaklıklardan kaçınılmalıdır. Bu kurutulmuş malzeme serilir ve zehiri alındıktan sonra hayvan yeminde katkı veya balık yemi olarak değerlendirilebilir. Katısı alınmış fermente gübre ise besin ve iz elementler yönünden zengindir ve alg üretiminde kullanılabilir (Anon., 1980b; Stafford vd., 1981; Palmer, 1981; Vijayalekshmy, 1985; Winfield, 1986; Marchaim, 1992; Anon., 1999e).

Fermente atık seperatörden geçirilirse lifli yapıda katı gübre ve sıvı gübre elde edilir. Katı gübre toprak şartlandırmada, torf yerine kullanılırken, sıvı gübre inorganik gübrelerin yerine kullanılır. Anaerobik

fermentasyonda kütle denkliğine baktığımızda, reaktöre giren kütlenin % 2–4' ü biyogaza dönüşür. Reaktör çıkışında kütle % 98–96 oranına iner. Bu kütlenin yaklaşık % 7-25'i katı, % 75-93'ü sıvı haldedir. Kütle denkliğinin şematik gösterimi Şekil 2.17'de verilmiştir (Anon., 2000a; Boyd, 2000).



Şekil 2.17 Anaerobik fermentasyonda kütle denkliği

Fermente olmuş gübrenin fermente olmamışa göre, yetiştirilen bitki türü ve toprak özelliklerine bağlı olarak, ürün verimini % 10–30 oranında artırdığı rapor edilmiştir (Stuckey, 1981; Sasse, 1988; Marchaim, 1992; Anon., 1999d; Koçar ve Eryaşar, 2004; Kocar, 2007). Hindistanda fermente gübrenin kullanımı kimyasal gübre kullanımını % 30-35 oranında düşürmüştür (Anon., 1999b).

Fermente gübre içerisinde ağır metallerin bulunması olasıdır. Fakat hayvan atıklarında, domuz dışında, bu sorunla çok az karşılaşmaktadır. Domuzlarda besinlerin çevrim verimlerini yükseltmek için hayvan yemine bakır eklenmektedir. Bakırın toksik etkisini azaltmak

için çinko da eklenebilmektedir (Monnet, 2003). Sebze yetiştiriciliğinde yaklaşık olarak hektar başına 200 kg N ihtiyacı göz önüne alındığında, yıllık gerekli fermente gübre ihtiyacı 678 m³ civarında olmaktadır. Bu da günlük 1,86 m³ demektir. 5 m³ kapasiteli bir reaktör ve 20 gün bekletme süresi göz önüne alındığında, günlük 0,25 m³ üretim, 0,14 hektar için yeterli olabilmektedir (Gomez ve Gonzalez, 1977).

2.17 Biyogazın Arıtılması – Biyometan

Ham biyogaz, genel olarak % 40–70 CH₄, % 60–30 CO₂ ve H₂S, N₂, H₂, CO gibi diğer gazlardan oluşur (Anon., 1999b). Eğer besleme materyalinin tamamı hayvansal ve bitkisel yağlardan oluşmuyorsa, üretilen biyogazın CH₄ içeriğinin % 70'in üzerinde olması teorik olarak mümkün değildir. Bu değer üzerinde metan elde edilen sistemler, fermente malzemenin CO₂'yi absorblamasıyla oluşmaktadır (Krich vd., 2005). Gerekli durumlarda istenmeyen gazların biyogaz içerisinde uzaklaştırılması ve CH₄ oranının artırılması için çeşitli arıtma yöntemleri kullanılır. Biyogazın arıtılmasında dört faktör rol oynamaktadır:

- 1- Isıl değerini artırmak,
- 2- Korozyonu önlemek,
- 3- İnsan sağlığını korumak,
- 4- Çevre kirliliğini azaltmak (Anon., 1997a).

Biyogazın arıtımında üç bileşik göz önüne alınır. CO₂, H₂S ve su (Strevett vd., 1995). Biyogazın arıtılmasıyla elde edilen CH₄ oranı yüksek gaza, biyometan adı verilmektedir. Biyogazın arıtılmasıyla elde edilebilecek ürünler:

- 1- Sıkıştırılmış biyometan,
- 2- Fischer – Tropsch sentez prosesi ile benzin veya dizel yakıtların yerine kullanılabilecek sıvı hidrokarbonlar,
- 3- Metanol,
- 4- Hidrojen,
- 5- Sıvılaştırılmış biyometan (Krich vd., 2005).

Biyogazın taşıtlarda kullanımının yaygın olduğu İsveç'te, kullanılacak biyogaz için standartlar getirilmiştir. Buna göre CH₄ oranı minimum % 95, su buharı oranı maksimum 32 mg/Nm³, H₂S oranı maksimum 23 mg/Nm³ ve O₂ oranı maksimum % 1 olmalıdır. Aynı ülkede şehir içi otobüslerde 60.000 km için yapılan emisyon değerlendirmesinde, motorin ile çalışan otobüslere göre biyogazla çalışanların, NO_x emisyonlarının % 60, CO emisyonlarının % 90, hidrokarbon emisyonlarının % 80 ve parçaçık emisyonlarının %60 daha az olduğu rapor edilmiştir. Çevrimsel olarak bakıldığında CO₂ emisyonu ise 0 olmaktadır (Anon., 2000e). Eğer biyogazda metan miktarı % 90'a çıkarılabilirse, % 25 biyogaz-% 75 doğal gaz karıştırılarak kullanılabilir. Arıtılmazsa, yaklaşık % 8 biyogaz- % 92 doğal gaz karışımı, kullanım için uygundur (Jensen ve Jensen, 2000). İçten yanmalı motorlarda biyogaz kullanıldığında, NO_x emisyonu azalmakta, hidrokarbonların emisyonu artmaktadır (Huang ve Crookes, 1998). NO_x emisyonunun az olması biyogazın içerdiği CO₂'den kaynaklanmaktadır (Monnet, 2003). Ham biyogazın arıtılması yerine, fermentasyon sırasında biyolojik yöntemlerin kullanılmasıyla, üretilen biyogazın içerisindeki CH₄ yüzdesi artmaktadır. Yani fizikokimyasal yöntemlerdeki istenmeyen bileşiklerin giderilmesi yerine, oluşması engellenmektedir (Strevett vd., 1995).

CO₂ içeriği, su buharıyla birlikte zayıf asit oluşturur ve korozyona neden olur. Ayrıca sıkıştırma sırasında kompresör içinde kuru buz

oluşumuna neden olur (Vijayalekshmy, 1985). Biyogaz reaktörlerinde CO₂ miktarı, kullanılan materyale, bekletme süresine, pH ve sıcaklık seviyesine, reaktör çalışma basıncına, reaktör geometrisine ve tipine bağlı olarak değişmektedir. Yakma sistemlerinde CO₂ arıtımına gerek olmamaktadır (Edelmann, 2002). CO₂ gideriminde genellikle dört metot kullanılmaktadır.

- 1- Su ile temizleme,
- 2- Polietilen glikol ile absorblama,
- 3- Karbon moleküler elek kullanma,
- 4- Membranla ayırma.

Su ile temizlemede, CO₂ ve H₂S'in metana göre daha fazla çözünmesinden yararlanılır. 1 atm basınçta ve 21 °C'de 1 lt suda 1,8 gr CO₂ çözünürken, sadece 4 mg CH₄ çözünmektedir (Krich vd., 2005). Su ile CO₂ gideriminde genellikle % 5-10 arası CO₂ geriye kalabilmektedir (Kapdi vd., 2005). Giderim sonrasında ısı değeri 37,3 MJ/m³'e kadar yükseltilebilmektedir. Fakat uzun süre kullandıktan sonra suyun değiştirilmesi gerekir. Çünkü içerisinde zararlı sülfürler ve kirlenme meydana gelir (Vijayalekshmy, 1985). CO₂ arıtımında, kireç çözünmüş su dolu bir deponun içerisinden biyogaz geçirilir ve kalan atıklar potaslı gübre olarak kullanılır. Arıtılan karbondioksit seralarda kullanılabilir. Elde edilen CO₂'nin bir kullanım şekli ise kuru buz üretimidir. Yaklaşık olarak 1 m³ biyogazdan 0,3–0,5 kg kuru buz elde edilebilmektedir (Arnott, 1985). Sodyum hidroksit ve kalsiyum hidroksit CO₂ arıtımında kullanılabilir (Vijayalekshmy, 1985). CO₂ ve H₂S gideriminde, camı polimerlerden imal edilmiş membranlar kullanılabilmektedir. Bu malzemeler, CO₂ ve H₂S'i, CH₄ ve yüksek hidrokarbonlara göre daha fazla geçirmektedir (Stern vd., 1998). CH₄ artışını sağlamak için bir çalışmada, reaktörden alınan ve içerisinde çözünmüş olarak CO₂ bulunan

fermentasyon materyali, hava ile CO₂'si giderilecek şekilde işleme tabi tutulmuş ve sisteme geri beslenmiştir. Bu çalışmada CH₄ üretiminin % 90 civarında olduğu tespit edilmiştir (O'keefe vd., 2000).

İnorganik sülfür ve sülfat, fermentasyon sırasında H₂S'e dönüşür. Sülfat indirgeyen bakteriler, asetik ve propiyonik asitten H₂S üretirler (Truong ve Abatzoglou, 2005). H₂S'in kaynağı besleme materyalinde bulunan proteinler ve sülfürlü bileşenlerdir (Hagen vd., 2001). Çok miktarda nitrat ve sülfat içeren atık maddeler anaerobik fermentasyon sırasında, metan evresinden önce azot ve H₂S üretirler (Stuckey, 1981). Besleme materyalinin içerdiği sülfat miktarına bağlı olarak biyogaz içerisinde 1500–5000 ppm yani % 0,15–0,5 veya 2,1–7 g H₂S/m³ bulunabilmektedir. H₂S fermente malzemede çözünmüş halde ve gaz halinde bulunur. Yüksek konsantrasyonlarda sistemin inhibe olmasına neden olur (Muche ve Zimmermann, 1985). Bu yüzden H₂S miktarı fazla olduğunda ayrı bir kimyasal reaktörde H₂S giderimi daha uygun olmaktadır (Park vd., 2005). H₂S yanıcı ve zehirli bir gazdır. 0,05–500 ppm gibi düşük konsantrasyonlarda dahi, oluşan çürük yumurta kokusuyla hissedilebilir. Suda çözündüğünde zayıf asit formuna dönüşür. Yanması sırasında oluşan SO₂, asit yağmurlarına neden olan yüksek derecede korozif sülfürik asit oluşumuna neden olur. Havada % 0,1 oranında bulunması durumunda derhal, % 0,05 civarında bulunması durumunda 30 dakikada ölüme sebep olur (Muche ve Zimmermann, 1985). H₂S'in mekan içinde izin verilebilecek sınır değeri 5–20 ppm'dir (Anon., 1980a; Krich vd., 2005). H₂S korozyona ve kötü kokuya neden olur (Jenangi, 1981). Hidrojen sülfür, içten yanmalı motorlarda korozyon ve aşınmaya sebep olurken yanma ürünlerinde sülfür dioksit oluşumuna neden olur. H₂S özellikle metal yüzeylerde aşınmaya sebep olur. Galvanizli parçalar da bu korozyona maruz kalır. Demir dışı malzemelerde, vanalarda, bağlantı elemanlarında, gaz sayaçlarında,

basınç regülatörlerinde korozyona neden olur. Yanma ürünlerinde oluşan SO_2 nedeniyle, biyogazın yakıldığı sistemlerin bacalarında korozyon meydana gelir. İçten yanmalı motorlarda, düşük sıcaklık esnasında, özellikle durma ve kalkış zamanlarında sülfürik asit motor parçalarında yıpranmaya neden olur. Servis ömrü bu yüzden normalin % 10-15'i azalır. Ayrıca SO_2 motor yağında çözünerek asitliğini artırır ve yağlama özelliğinin kaybolmasına neden olur. Bu yüzden yağ değiştirme süresi yaklaşık 200–250 saate kadar düşer. Pişirme ve aydınlatma amaçlı kullanımlarda, cihazların bulunduğu odaların havalandırılması gereklidir (Muche ve Zimmermann, 1985). H_2S birikmesi kapalı alanlarda göz tahrişine neden olabilmektedir. Biyogaz içerisinde H_2S bulunması, baca gazında SO_2 ve SO_3 emisyonuna neden olur (Truong ve Abatzoglou, 2005). Özellikle SO_2 'den, korozif etkisi yüksek olan H_2SO_3 (sülfüroz asit) oluşur (Krich vd., 2005). İçten yanmalı motorlarda kullanımda, motor durdurulduğunda, içindeki biyogaz tamamen boşaltılmalıdır. Yoksa içerisinde bulunan H_2S çözünerek korozyona neden olur (Boyd, 2000). Biyogaz, H_2S miktarı 700–1500 ppm arasında olduğunda, içten yanmalı motorlarda önemli bir korozyona neden olmadan kullanılabilir (Jensen ve Jensen, 2000). Çoğu motor üreticileri H_2S için 1500 ppm yada % 0,15 (hacimsel) oranı, kabul edilebilen üst sınır olarak verirler (Mitzlaff, 1988). Biyogazın arıtıldıktan sonra doğal gaz hattına verilebilmesi için, H_2S miktarının $0,006 \text{ g/m}^3$ 'e düşürülmesi gerekmektedir (Vijayalekshmy, 1985). Yakıt hücresi uygulamalarında biyogaz kullanılacağı zaman, H_2S miktarı 4 ppm'in altında olmalıdır (Spiegel ve Preston, 2000).

H_2S 'in giderilmesi için kullanılan yöntemler;

- Biyogazın içine O_2 veya hava verilmesi,
- Besleme materyaline demir klorür katılması,

- Demir talaş içerisinde biyogazın geçirilmesi,
- Demir oksit peletlerin içerisinde biyogazın geçirilmesi,
- Aktif karbon kullanılması,
- Su ile temizleme,
- Sodyum hidroksit ile temizleme,
- Biyolojik desülfürizasyon olarak sıralanabilir (Anon., 1999a).

Biyogaz içerisine yaklaşık olarak % 2–6 hava karıştırıldığında, yüzeyde bulunan bakteriler, H_2S 'in oksitlenmesini gerçekleştirirler. Bu proses hem kimyasal hem de biyolojik bir prosestir. *Thiobacilli* bakterileri her yerde bulunmaktadır ve ayrıca aşılama gerektirmez. Oksijene ve besine ihtiyaç duyarlar (Anon., 1999a; Jensen ve Jensen, 2000; Monnet, 2003; Krich vd., 2005; Van der Zee vd., 2007). Fakat biyogazın içerisine hava karışmasının engellenmesi için, reaktörle bağlantılı ve havalandırılmış fermente atığın sirküle edildiği bir depo kullanılmalıdır. Böylece H_2S 'in giderilmesi aynı yolla sağlanmış olur (Nishimura ve Yoda, 1997). Ya da doğrudan gazometrenin içerisine bir miktar hava veya oksijen verilerek H_2S % 80–85 civarında azaltılabilir. Biyogazın içerdiği H_2S miktarına göre verilmesi gereken hava veya oksijen miktarları Çizelge 2.6'da verilmiştir (Mitzlaff, 1988).

Çizelge 2.6 İçerdiği H_2S miktarına göre biyogaza verilmesi gereken hava ve oksijen miktarları

Biyogaz içerisindeki H_2S miktarı		Gerekli oksijen miktarı %	Gerekli hava miktarı %
ppm	% Hacim		
500	0,05	0,025	0,125
1000	0,10	0,050	0,250
1500	0,15	0,075	0,375
2000	0,20	0,100	0,500
2500	0,25	0,125	0,625
3000	0,30	0,150	0,750

Birçok reaktör % 0,3–2 H_2S üretir. H_2S üretiminin artması durumunda reaktöre daha az sülfür içeren materyaller verilir veya su oranı fazlalaştırılır (Muche ve Zimmermann, 1985). Besleme materyaline demir klorür ($FeCl_2$) eklenmesi de H_2S gideriminde uygulanabilir (Hagen vd., 2001). Fakat malzemenin pahalı olması, klorun korozyona neden olması, reaktör içindeki bakterilerin ölme riski, bu tip kullanımı engellemektedir (Boyd, 2000). Ayrıca H_2S miktarının yüksek olduğu tesislerde bu yöntem pahalıdır (Jensen ve Jensen, 2000).

Oluşan H_2S 'in giderilmesinde iki uygulanabilir yöntem daha vardır. Bunlardan birincisi, biyogazın bakır sülfat-su karışımından geçirilmesidir. H_2S bakır tarafından tutulur ve siyah bir çökelti meydana gelir. Diğer yöntemde, biyogaz demir yonga içerisinden geçirilir (Jenangi, 1981). Üçüncü dünya ülkelerinde kullanılabilen giderim yöntemleri içinde gazın demir yonga içeren toprak içinden geçirilmesi,

en ucuz ve kolay uygulanan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde demir içeren toprak veya demir cevheri, gaz sızdırmaz bir hacim içerisinde tabakalar şeklinde hazırlanır. Biyogaz bu hacmin altından girer, demir sülfür (FeS_2) oluşur ve üstten H_2S 'i alınmış olarak çıkar. İçerilen demirin miktarına göre, materyal boşaltılır ve yeni materyalle doldurulur. Boşaltılan malzeme atmosfere açık olarak bekletilerek rejenerasyon sağlanır ve tekrar kullanılır. Malzeme yere serilerek ve arada bir ters yüz edilerek yaklaşık 1–2 gün bekletilir. Tekrar kullanım, materyalin içerdiği demirin bozunmasına kadar sürdürülebilir. Bu işlem yaklaşık 10 kez tekrarlanabilir. Bir rejenerasyon yöntemi de az miktarda havanın biyogazla karıştırılarak verilmesidir. Fakat hassas gaz ölçüm ve kontrol cihazları gerektirdiğinden, küçük tesisler için uygun değildir (Muche ve Zimmermann, 1985). Demir hidroksit ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) de H_2S arıtımı için kullanılabilir. Katı demir hidroksit kullanıldığında, rejenerasyon için içerisinde sıcak hava geçirilir. Fakat sıcaklıkla beraber çok fazla havaya maruz bırakmak, biriken sülfürün yanmasına neden olur. Bu durumda SO_2 emisyonu oluşur (Vijayalakshmy, 1985). Diğer bir yöntem demir oksit (hematit- Fe_2O_3) kullanımıdır. H_2S hematit ile reaksiyona girerek, demir sülfür (FeS) oluşturmakta, demir sülfürün oksidasyonu ile kükürt ve hematit tekrar elde edilebilmektedir. 1 m^3 hematit, 2 g/m^3 H_2S bulunduran, yaklaşık 33.000 m^3 biyogazı temizleyebilmektedir. Ham biyogaz, demir klorid (FeCl_3) ile doyurulmuş talaş içerisinde geçirilebilmekte, H_2S yine demir sülfür şekline dönüşmektedir. Çinko oksit de aynı amaçla kullanılabilir (Hagen vd., 2001).

H_2S arıtımında ayrıca doğal veya sentetik absorbentler kullanılır. Bu absorbentlerin içindeki demir miktarı, en az ağırlığının % 40-50'si civarında olmalıdır. Aktif demirin, toplam demir içindeki oranı da en az % 70 olmalıdır. Bu prosesde en uygun sıcaklık aralığı, 15–25 °C'dir. H_2S gideriminde kullanılan yöntemlerden birisi, sönmüş veya sönmemiş kireç

ile arıttır. Fakat bu prosesler, büyük ölçekli tesislerde, çok miktarda kokulu atık yaratması ve bu atığın bertarafının zor olması nedeniyle kullanım yönünden uygun değildir (Muche ve Zimmermann, 1985).

H_2S , CO_2 kadar suda çözünmese de miktarı azaltılabilir. Suyun tekrar kullanılması için arıtılması gerekmektedir. Fakat H_2S yüzünden su içinde sülfürlü bileşenler çoğalmakta ve problemlere yol açmaktadır. Suyun bol ve ucuz olduğu yerlerde devamlı yeni su kullanılması daha sağlıklıdır (Anon., 1999a). Bazı solventler ve zeolit de H_2S arıtımı amacıyla kullanılabilir. Zeolit, biyogazın nemini de alır. Tekrar kullanılması için içinden sıcak hava geçirilmesi gerekir (Vijayalekshmy, 1985). Polietilen glikol ile temizleme de su ile temizleme gibi fiziksel bir prosestir. Ticari olarak kullanımdaki markalardan biri selexoldür. Suyu göre içerisinde CO_2 ve H_2S 'in çözünmesi daha fazladır. Ayrıca bu yöntemle halojenler ve su da giderilmiş olur (Anon., 1999a). Yine H_2S arıtımı için kullanılan yöntemlerden biri, ham biyogazın aktif karbon içerisinde geçirilmesidir (Vijayalekshmy, 1985).

Biyogazın içerisinde $35\text{ }^{\circ}C$ 'de yaklaşık 35 gr/m^3 su buharı bulunmaktadır. Bu değer $20\text{ }^{\circ}C$ için yaklaşık 17 gr/m^3 'dür (Munoz ve Lopez, 2000). Biyogaz içerisinde, termofilik bölgede çalışıldığında, 50 mg/l su buharı bulunabilmektedir. Biyogazın içinde su buharının yüksek oranda bulunması, alevin kırmızımsı oluşundan fark edilebilir (Arnott, 1985). Su buharı, alev sıcaklığına, alt ısı değere ve yakıt-hava oranına etki eder. Ayrıca gaz hattında yoğunlaşarak, H_2S 'le birleşerek korozif asitli bileşik (sülfürik asit) oluşturur, donmaya ve tıkanmaya neden olur. Yine CO_2 ile birleşerek karbonik asit oluşturur. Biyogazın brülörde yakılacağı zaman içinde bulunan su buharının giderilmesi önerilmektedir. Aksi halde memelere zarar verebilir. Bu yüzden biyogazdaki su içeriğinin giderilmesi gerekir (Vijayalekshmy, 1985; Walsh vd., 1989; Monnet,

2003; Krich vd., 2005). Giderim yöntemleri, su absorblayan sıvı ve katıların kullanılması veya gazın sıkıştırılarak veya soğutulularak suyun yoğunlaştırılmasıdır (Vijayalekshmy, 1985). Biyogazın soğutulularak su buharının yoğunlaştırılmasında, soğutucuya harcanan enerji, elde edilen biyogazın enerji içeriğinin yaklaşık olarak % 2'sidir (Krich vd., 2005).

2.18 Biyogaz Sistemlerinde Karşılaşılan Sorunlar

Genel sorunlar, karıştırıcı sistemlerde ve özellikle pompalarda meydana gelen arızalar, çökme sonucu oluşan tıkanıklıklar, köpük oluşumu ve gaz iletim hattındaki ekipmanda, biyogazla çalışan cihazlarda oluşan korozyon olmaktadır (Hocking vd., 1984). Gaz çıkışı hızlandığında, bazı partiküller reaktör yüzeyine doğru taşınır ve köpük tabakası oluşturur. Bu köpük gaz içerdiği ve hafif olduğu için yüzeyde birikir. Yeterli karıştırma olmadığında tabakalaşır. Mekanik tip karıştırıcıların kullanıldığı reaktörlerde köpük sorunu minimum seviyede tutulabilmektedir. Hayvan gübresi içerisinde bulunan saman parçaları, çim, hayvan kılları gibi bazı materyaller, karıştırma esnasında yüzeye çıkarak tabaka oluştururlar. Özellikle besleme materyalinin bir parçalayıcıdan geçirilmeden reaktöre verilmesinde bu durumla karşılaşılır. Bu materyaller pompa ve borularda tıkanıklık ve sorun oluşmasına neden olurlar (Jenangi, 1981; Leggett vd., 2002). Bitkisel atıkların kullanıldığı proseslerde köpük oluşumunun önüne geçmek çok zordur (Werner vd., 1989). Bu proseslerde, besleme materyali sıvı yüzeyinde birikir ve tıkanmalara neden olur. Köpük problemi, yatay reaktörlerde, dikey reaktörlere göre, sıvı yüzeyinin büyük olmasından dolayı daha az olur (Arnott, 1985; Tosun vd., 1986; Madhukara vd., 1997). Köpük gideriminde bir yöntem besleme materyalinin köpüğün üzerine verilmesi ve oluşan köpüğün dibe çökmesinin sağlanmasıdır (Anon., 2000c). Bir diğer köpük önleme yöntemi, toksik olmayan köpük

kırıcı kimyasalların sisteme beslenmesidir. Önlem olarak reaktörün gaz çıkışı köpük tarafından tıkanmayacak şekilde dizayn edilmelidir (Stafford vd., 1981). Taze sığır gübresi kullanıldığında, köpük problemiyle genellikle karşılaşılmamaktadır. Köpük probleminden kaçınmak için besleme materyalinin yeterli derecede karıştırılarak reaktöre verilmesi gerekmektedir (Anon., 1999c). Mandıralardan alınan atıklar, kullanılan altlığa bağlı olarak yoğun saman ve yüzücü madde içerdiğinden, köpük problemine neden olmaktadır. Bu atıkların elenerek ve ön işlemden geçirilerek reaktöre verilmesi hem köpük problemini azaltmakta, hem de reaktör içerisinde birikim nedeniyle oluşan efektif hacim düşüşünü engellemektedir. Ayrıca biyogaz verimi de bu yolla yükselmekte, hidrolik bekletme süresi düşmektedir. (Lo vd., 1984)

Fermentasyona uğramayan ağır maddeler dibe çöker ve reaktörün efektif hacmini azaltırlar. Hayvan altlığında bulunan ve besleme materyaliyle reaktöre verilen kum, reaktör içerisinde birikir ve tıkanıklıklara yol açar (Rozdilsky, 1997). Bu durumdan kaçınmak için hayvan atıklarının beton üzerinden toplanması veya besleme materyalinin çökelmeyi sağlayacak bir havuzda bekletilmesi bir seçenektir (Arnott, 1985). Çökelmenin önüne geçebilmek için çamur pompalarıyla veya mekanik olarak karıştırma yapılır. Ayrıca ısıtma borularının yerleşimi düzenlenerek, yaratılan termal sirkülasyonla çökelmenin önüne geçilebilir (Jenangi, 1981; Leggett vd., 2002). Küçük uygulamalarda ise reaktöre bir kapak eklenerek reaktörün temizlenmesi sağlanır (Jenangi, 1981). Reaktörlerde temizleme yapılmadığında kullanım hacmi azalmakta ve biyogaz üretimi düşmektedir. Bu yüzden belirli periyotlarda reaktör temizlenmelidir (Kalia ve Kanwar, 1998). Genellikle 9–12 aylık dönemlerde bu temizlik yapılmalıdır. Temizlik sonrasında 2–4 hafta gaz düşüşüyle karşılaşılabilir. Bu da sistemin yıl boyunca 11 ay efektif olarak işletilmesi anlamına gelmektedir (Safley, Jr. vd., 1987). Hayvan

altlığı olarak parçalanmış gazete kullanılması, kolay fermente olması nedeniyle biyogaz üretimini artırmakta, çökelme ve tıkanıklıkları azaltmaktadır (Anon., 2001a).

Biyogaz sistemlerinde, sıcaklığın çok düşmesi, yüklemenin aşırı olması, bakteriler için gerekli besinlerin yetersizliği, deşarj edilen fermente gübrede bakterilerin fazla olması veya besleme materyalinin antibiyotik gibi toksik maddeler içermesi dengenin bozulmasına neden olabilmektedir (Van Die, 1987). Dengenin bozulduğunun göstergesi, metan üretiminin ve pH'ın düşmesi, CO₂'nin ve uçucu yağ asitlerinin miktarının artmasıdır. Bu durumda;

- Katı maddelerin yeniden sisteme verilmesi,
- Yükleme sıklığının artırılması,
- Yeterli karıştırma yapılması,
- Biyogaz sirküle ediliyorsa içindeki CO₂'nin arıtılması,
- Baz eklenmesi,
- Yıkılarak atılan bakterilerin sisteme yeniden verilmesi,
- Beslemenin azaltılması ya da tamamen durdurulması,
- Fermente olmuş materyalin besleme materyaliyle karıştırılarak yeniden sisteme beslenmesi, sistemin iyileştirilmesi için kullanılabilir (Stafford vd., 1981; Marchaim, 1992).

Biyogaz sistemlerinde dengenin izlenmesinde en çok başvurulan yöntem, ölçüm kolaylığı nedeniyle pH seviyesinin takip edilmesidir. pH düşmesine karşı bir yöntem, beslemenin kesilmesidir. Bu yöntemle metan bakterilerinin yağ asiti konsantrasyonunu düşürmesi sağlanır. Böylece pH seviyesi yükselir. Bu yöntem yavaştır ve asit bakterilerinin üretimlerini engeller. Diğer bir yöntem kimyasal eklemektir. pH

seviyesindeki düşmeleri engellemek için besleme materyaline kireç, sodyum bikarbonat veya amonyak+su karışımı eklenebilir. Kireç eklenirken, her bir litre materyale 0,2-0,3 gram suda çözünmüş kireç eklenir (Arnott, 1985; Marchaim, 1992). Sistem başlatıldığında ilk birkaç günde biyogaz üretilmeye başlar, fakat gaz içerisinde CO₂ yüksek oranda bulunmaktadır. Sistemin stabil hale gelmesi için yaklaşık birkaç ay gerekebilir (Anon., 1980b; Arnott, 1985). Biyogaz sistemlerinde stabilizasyonu sağlamak ve biyogaz üretimini artırmak amacıyla besleme materyaline uygun konsantrasyonlarda glikoz ve asetat eklemesi yapılabilmektedir. Bu durumda pH kontrolü için ek maddelerin eklenmesi de gerekmektedir (Simeonov ve Queinnec, 2006).

Çoğu biyogaz reaktöründe başlatma evresinde, aşırı veya düzensiz yükleme oranları nedeniyle sorun yaşanmaktadır. Aşılama biyogaz artışını sağlayabilmektedir (Dangoggo vd., 1996). Aşılama özellikle proses başlangıcında süreyi kısaltmak için kullanılmaktadır. Yoksa bu süre 1–4 haftayı bulabilmektedir. Sığır atığı, içerisinde Mezofilik bakterilerin bulunması nedeniyle aşı olarak kullanılabilir (Werner vd., 1989; Nand vd., 1991). Büyükbaş hayvanların atığı kullanıldığında, yaz aylarında elde edilen biyogaz miktarıyla, kış aylarında elde edilen miktar arasında, hayvanların yazın otlaklarda olmasından ve atığın tümünün elde edilememesinden dolayı, farklılık oluşur. Bu durum yaz aylarında çoğalan bitkisel atıkların hayvan atıklarıyla birlikte kullanılmasıyla düzeltilebilir. Bu atıkların biyogaz potansiyeli daha fazladır (Anon., 2002c).

Biyogaz 1: 8-20 oranında havayla karıştığında, patlayıcı bir karışım oluşturur. Bu yüzden örneğin Almanya'da 5 m³ gaz hacmi için 3 m, 5-100 m³ için 5 m, 100-500 m³ için 10 m güvenlik bölgesi öngörülmektedir (Eggeling vd., 1985). Biyogazın oda sıcaklığında LEL (alt patlama limiti)

seviyesi metandan daha yüksek (% 4,8-% 5,1), UEL (üst patlama limiti) seviyesi daha düşüktür (% 11,4-% 16,8). Ortam sıcaklığı arttıkça LEL çok az değişirken, UEL önemli derecede düşmektedir. Bu da patlama riskinin sıcaklık artışıyla düştüğünü göstermektedir (Dupont ve Accorsi, 2006). Patlamalara karşı gaz hattına alev kapanı yerleştirmek ve ex-proof motor ve pano seçimi yapmak gerekir. Biyogaz içerisinde bulunan su buharının yoğunlaşması nedeniyle oluşabilecek tıkanıklıklar göz önüne alınarak hat üzerine kondens alma ekipmanları monte edilmelidir. Ayrıca gaz ölçüm cihazları içerisindeki yoğunlaşan buharın kış aylarında donarak cihaza zarar vermesini önlemek amacıyla, ısıtıcı bantların veya diğer yöntemlerin kullanılması gerekebilir (Stafford vd., 1981). Metal reaktörlerde yıldırıma karşı koruma sağlamak için metal bir parça toprağa gömülür ve reaktörle bağlantısı sağlanır (Arnott, 1985).

Biyogazın bileşimindeki metan ve karbondioksit zehirli değildir fakat yüksek oranda ortamda bulunduğunda, yetersiz oksijen nedeniyle boğucu olabilir. Biyogaz sistemlerinde asla negatif basınca izin verilmemelidir. Böyle bir durumda sistem içerisine hava kaçağı olabilir, patlama tehlikesi veya metan bakterilerinin ölmesi gibi durumlar söz konusu olabilir (Arnott, 1985). Biyogaz kaçağı, içerisinde bulunan H_2S nedeniyle, çürük yumurta kokusuyla fark edilebilmektedir. Proteinlerin degradasyonu sonucunda sülfür oluşur. Oluşan sülfat iyonları sülfidlere veya H_2S 'e dönüşür. Pirinç mlazemededen üretilmiş vana ve bağlantı elemanları, H_2S tarafından kolayca korozyona uğrar ve kaçak oluşmasına sebep olur. H_2S yumuşak çeliklerde de korozyona neden olur. Çelik yüzeylere epoxy kaplamaların uygulanması bu riski azaltır. Oksijen yokluğunda korozyon oldukça düşüktür. Özellikle sistemin boşaltıldığı ve bakıma alındığı zamanlarda korozyon riski artar. Beklenmedik sorunlara karşı sistem dizaynında, yardımcı cihazların mümkün olduğunca sistemi durdurmadan ya da boşaltma yapılmadan bakımı

yapılabilir şekilde montajı önemlidir. Reaktörün açılması ya da boşaltılması durumunda tekrar dengeye gelmesi, oldukça zaman alıcıdır. Bu yüzden hızlı müdahale ve ucuz yedek parçaların önceden tedarik edilmesi önem taşımaktadır. Biyogaz sistemlerinin bakımı üç kategori altında toplanabilir. Bunlar;

- 1- Acil durum bakımı: Sistemde beklenmeyen bir arıza olduğunda müdahale edilmesi,
- 2- Islah edici bakım: Sistemde meydana gelebilecek arızaları öngörerek önceden önlem almaya yönelik çalışmalar,
- 3- Önleyici bakım: Oluşabilecek arızaları önceden önlemeye yönelik, periyodik olarak yapılan bakımdır (Stafford vd., 1981; Arnott, 1985).

Vanaların yanlışlıkla kapanması veya gaz çıkışının köpük ya da buz nedeniyle bloke olması durumunda reaktör içerisinde gaz basıncının yükselmesi ve reaktörün zarar görmesi karşılaşılan sorunlardandır. Bu yüzden reaktör üzerine gaz emniyet ventili konulması gerekir (Stafford vd., 1981). Karıştırma ve beslemede santrifüj pompalar kullanıldığında, % 5-10 hidrolik değerlerde düşüşle karşılaşılabilir. Bu yüzden seçilen pompaların, bu düşüş değerleri göz önüne alınarak tespit edilmesi gerekir (Anon., 2000c).

2.19 Biyogaz Sistemlerine Sosyo-Ekonomik Yaklaşım

Biyogaz tesislerinin ekonomik analizi iki aşamada gerçekleştirilmelidir. Bu aşamalar;

- 1- Ülke ve toplum açısından fayda ve maliyetlerin incelendiği makro ekonomik analiz,
- 2- Kullanıcı açısından fayda ve maliyetlerin incelendiği mikro ekonomik analiz aşamalarıdır.

Ucuz ve uygun enerji üretimi, fermente gübre kullanımıyla tarımsal üretimin artışı mikro ekonomik analizde göz önüne alınırken, toprak yapısının düzeltilmesi, erozyonun azaltılması, ormanların korunması, kırsal kesim yaşayanlarının yaşam standartlarının yükseltilmesi, ithalatın azaltılması, istihdamın artırılması ve kırsal kesimdeki çalışanların yeteneklerinin artırılması makro ekonomik analizde değerlendirmeye alınmaktadır. Sağlık koşullarının ve hijyenin iyileştirilmesi gibi hem makro hem de mikro ekonomik analizde göz önüne alınması gereken getiriler de analizlere konu olmaktadır. Ekonomik yaklaşımda, başlangıç dışında gelecekteki etkilerin de göz önüne alınması gerekmektedir. Biyogaz sistemleri dışsal faydalar yaratır. Fakat bunun yanında, ithal edilen fosil yakıtlarla elde edilen fon ve vergi gelirlerinin düşmesi de söz konusudur (Anon., 1999d).

Biyogaz sistemlerinin ekonomik analizlerinde dikkate alınması gereken faktörler şunlardır:

- 1- Yatırım maliyetleri,
- 2- Tesisin kurulumunda ve işletimindeki işgücü maliyetleri,
- 3- Müşterek tesislerde gaz dağıtım hattının maliyetleri,
- 4- Diğer ekipmanların yıllık enerji maliyeti,
- 5- İşletme, bakım ve değişiklik maliyetleri,
- 6- Yıllık yağlama maliyeti,
- 7- Biyogaz üretimi süresince pompalamada kullanılacak enerjinin yıllık maliyeti,

- 8- Yasal izinlerle ilgili maliyetler,
- 9- İşleticilerin eğitimlerinden doğan maliyetler,
- 10- Biyogazın kullanım ve iletiminde kullanılacak tüm ekipmanların maliyetleri,
- 11- Kullanılacak atığın tipi, toplama kayıpları ve sistemin bakım için durdurulduğu zaman oluşacak kayıplar göz önüne alınarak, yıllara göre elde edilebilecek miktarı ve devamlılık güvencesi,
- 12- Özellikle nitratça zayıf bölgeler ve kullanılabilecek alanlar göz önüne alınarak, elde edilen sıvı gübrenin kullanılabilirliği,
- 13- Geriye kalan katı fermente gübrenin kullanılabilmesi veya satışının mali getirisi,
- 14- Kullanılabilecek atıkların kg başına biyogaz verimleri,
- 15- Pişirme için gerekli yıllık biyogaz ihtiyacı,
- 16- Elektrikli aydınlatma için yıllık biyogaz ihtiyacı,
- 17- Pompalar için gerekli yıllık biyogaz ihtiyacı,
- 18- Dizel ya da kullanılacak referans yakıtın birim fiyatı,
- 19- Üretilen biyogazın ısı ve elektrik enerjisi şeklinde kullanılabilirliği ve pazarlanma olanakları,
- 20- Tarımsal gelirlerde, fermente gübrenin besleyici ve toprak iyileştirici etkisinden dolayı oluşabilecek marjinal artış miktarı,
- 21- Tesisin büyüklüğü, konumu, varsa elektrik üretimi ve bölgesel planlamaya etkileri, şebekeye bağlantı olanakları ve maliyetleri,
- 22- Bölgesel olarak mümkün olabilecek parasal ve diğer devlet destekleri de göz önüne alınarak, finansal maliyetler ve geçerli iskonto oranı,
- 23- Taşıma maliyetleri ve lojistik planlama,
- 24- Tesisin ekonomik ömrü.

Ekonomik maliyetler, yatırım maliyetlerini, proje geliştirme maliyetlerini, bakım ve onarım faaliyetlerini de içerecek şekilde işletme maliyetlerini ve eğitim maliyetlerini kapsamaktadır (Arnott, 1985; Anon., 2000a). Özellikle hayvansal atıklar söz konusu olduğu zaman, biyogaz tesislerinde maliyeti oluşturan sistem parçaları şunlardır:

- 1- Atıkların toplandığı yer,
- 2- Toplama sistemi,
- 3- Ön çökeltme ve ayırma sistemi,
- 4- Biyogaz reaktörü,
- 5- Fermente gübrenin katısının ayrılması,
- 6- Biyogazın toplanması ve enerji dönüşümünün sağlanması,
- 7- Sıvı fermente gübrenin depolanması ve kullanılması,
- 8- Katı bölümün giderilmesi veya kullanılması.

Çoğu uygulamada 3, 5 ve 8. maddeler olmayabilmektedir (Dennis ve Burke, 2001). Ekonomik fizibilite çalışmasında, yatırım maliyetleri içerisinde göz önüne alınması gereken harcama kalemleri şu şekilde sıralanabilmektedir (Anon., 1999d):

- 1- Planlama ve araştırma çalışmaları,
- 2- Arazi gideri,
- 3- İnşaat harcamaları,
- 4- Sistemin ve gerekli yapıların kurulumu,
- 5- Tesisat harcamaları,
- 6- Mekanik ekipman alımları,
- 7- Nakliye ve sigorta giderleri,
- 8- Vergiler,
- 9- Diğer harcamalar(Anon., 1999d).

Yapılan analizlerde çoğunlukla, biyogaz sistemleri ekonomik olarak yapılabilir çıkmaktadır. Özellikle elde edilen enerjinin kullanımının mümkün olduğu ve ürünlerin tümünün kullanıldığı endüstriyel büyük ölçekli tesislerde, avantaj daha fazladır. Yine büyük ölçekli çiftlik tipi tesisler için yapılan analizlerin sonuçları, ekonomik görünmektedir. Sosyal kar-zarar analizinde, özellikle teknolojinin ikincil getirilerini sayısal olarak belirlemede, karşılaşılan zorluklar vardır. Belirlenmesi zor veya imkansız olan bu getiriler;

- Odun toplamadan serbest kalan işgücü,
- Kırsal kesim kadınlarında azalan göz ve ciğer hastalıkları,
- Odun toplamaktan kaynaklanan yılan ve akrep sokmalarının azalması,
- Kırsal kesim kadınının, şehirde oturan kadınların pişirmede kullandığı LPG'ye benzer kullanımları yüzünden, kendilerini onlarla eşit hissetmeleri,
- Erkeklerin, dumansız bir evde daha çok vakit geçirmek istemeleri,
- Çevresel iyileşme,
- Tarımsal üretimdeki artışa bağlı olarak kalite ve miktar bakımından gelişen gıda tüketimi,
- Köylülerde, başarılı biyogaz sistemlerinin işletilmesiyle, yavaş yavaş oluşan kendine güven ve itimat hissi,
- Eğitim için aydınlatmanın daha iyi hale gelmesi,
- Daha çok boş zaman.

Ayrıca bireysel olarak harcamalarda sıfır alınabilen, hayvan atığı, odun, bitkisel atıklar, gübre gibi girdi ve çıktılar, makro seviyede önem kazanmaktadır (Vijayalekshmy, 1985; Kumar, 2000; Omer ve Fadalla, 2003). Biyogaz sistemleri dışsal ekonomiler sağlar. Kullanıcıların yaşam

şartlarının iyileştirilmesi ve sağlık harcamalarının azalması bunlardandır. Fosil yakıtların ithalatının düşürülmesi de dışsal faydalardandır. Fakat ithal edilen fosil yakıtlardan alınan vergilerin azalması dışsal maliyet olarak karşımıza çıkmaktadır. Biyogaz sistemleri, konvansiyonel yakıtların kullanımının azaltılması, ormanların ve bitki yapısının korunması gibi çevresel faydalar sağlamaktadır. Ayrıca, enerji piyasasında tekelleri yapılar nedeniyle oluşan, çarpık fiyatlandırmanın azaltılmasında etkili olmaktadır. Merkezi enerji sistemlerine bağlanmanın getireceği yatırım ve iletim kayıplarından oluşacak maliyetlerin azaltılmasına neden olur. Emek yoğun olan biyogaz sistemleri, kırsal kesimde hareketliliği artırarak, bölgesel dengesizliklerin giderilmesinde rol oynar. Sistemlerin kurulması ve işletilmesinde yerli kaynakların değerlendirilmesi sözkonusudur (Anon., 2000c). Makroekonomik analiz ve değerlendirmede göz önüne alınması gereken temel sayısal parametreler şunlardır;

- Kurtarılan ormanların fiyatı da eklenerek elde edilen ulusal enerji tasarrufu,
- Elektrik iletim hatlarında oluşan kayıpların azalması sonucu elde edilebilecek mali getiriler,
- Sağlık ve hijyen şartlarında oluşan iyileşmeler sonucu oluşan tasarruflar,
- Üretilen kimyasal gübredeki düşüş,
- İthal edilen enerji ve kimyasal gübredeki azalmanın parasal karşılığı.

Makro ekonomik analizde, biyogaz tesislerinin kurulumu ve işletimi sırasında oluşan harcamalar, yapım malzemelerini, işgücünü, sübvansiyonları, kurulan yaygınlaştırma merkezlerini, dışarıdan ithal edilen biyogaz ekipmanı ve bağlantı parçalarını içerir. Bunun dışında

otonom enerji sağlama, zanaatkarların ürünlerine ek talep, eğitimsel etkiler gibi niteliksel sosyo-ekonomik kazançlar da göz önüne alınmalıdır (Werner vd., 1989).

Yine makro seviyede sayısal olarak verilemeyecek katkılar sözkonusudur. Bunlar;

- Biyogaz sistemlerinin sağlığa, doğaya ve binalara olan çevresel etkileri,
- Araştırma geliştirme faaliyetlerinin, teknolojik bilgi birikimine katkısı,
- İşsizliğe etkisi,
- Bilimsel ve teknolojik bilginin, diğer endüstrilere de yayılmasını sağlaması,
- Konvansiyonel yakıt talebinin düşmesi sonucu, uluslararası yakıt fiyatlarında meydana gelen değişimler sonucu oluşan etkiler,
- İstihdamın kişisel ve toplumsal sonuçları,
- Endüstriyel kalkınma için ivme yaratılması,
- Ücretlere etkisi.

Biyogaz tesisleri, kırsal kesimde yeni atılımların yapılmasını teşvik eder (Anon., 2000a). Genel olarak biyokütle enerjisi üretiminde maliyetlerin yaklaşık olarak % 33'ü işgücünden oluşur. Fosil yakıtlarda ise bu oran % 7 civarındadır. Bu yüzden biyogaz sistemleriyle enerji ve gübre eldesi, daha emek yoğun olmaktadır ve istihdamı artırır. (Arnott, 1985; Falvey, 1996). 1 MW'lık bir tesis yaklaşık olarak 2-5 kişilik istihdam yaratır (Anon., 2000a). Seralar veya balık yetiştiriciliği gibi, son ürünleri kullanabilen yeni iş imkanlarının yerel olarak gelişmesini sağlar (Anon., 2000a). Sosyal harcama-yarar analizi yapılırken, tüm yatırım

giderleri ve getiriler piyasa fiyatlarıyla ele alınır. Girdilerin ve ürünlerin gölge fiyatları, alternatif kullanımları ve yapılan tasarrufların piyasa fiyatlarıyla değeri göz önüne alınır. Yatırımların ve tasarrufların ekonomik etkileri tüm yönleriyle analize dahil edilir. Örneğin enerji ya da gübre harcamalarının azalması sonucunda, tersi durumda oluşabilecek çarpan etkisi kaybedilmektedir. Yatırımların, gelirin yeniden dağıtılmasında oluşturacağı etkiler, göz önüne alınır. Biyogaz sistemlerinin yaygınlaşması sonucunda elde edilecek gelirin dağılımı, gelir düzeyi, hayvan ve arazi sahipliğiyle biçimlenmektedir. Üretim, servis ve teknolojide oluşacak uyum ve değişikliklerin sosyal değeri tahminlenmelidir. Bu sosyal değer, ekonomik değerinden yüksek veya düşük olabilir (Anon., 1999d). Tüm bunlar göz önüne alınmazsa, biyogaz sistemlerinin gerçek etkileri anlaşılamaz (Maeng vd., 1999).

Mikro ekonomik analiz dahilinde, tasarruf edilen konvensiyonel yakıtlara bağlı parasal kazançları hesaplamak kolay olurken, fermente gübrenin kullanımıyla ilgili hesaplar zor olmaktadır. Ayrıca parasal olmayan getirilerin, parasal terimlere çevrilmesi aynı oranda zordur. Mikro ekonomik değerlendirmede genellikle geri ödeme süresi, yani getiriler göz önüne alınarak yatırımın kaç yılda ödenebileceği, net bugünkü değer, yani düşünülen sistem ömrü için tüm gider-getirilerin bu günkü değerine indirgenerek karlılığın hesaplanması veya getirinin oransal olarak bulunduğu ve geçerli faiz oranıyla karşılaştırıldığı içsel karlılık oranı kullanılır. Son ikisinde sistem ömrünün farklı seçilmesi, farklı sonuçlara ulaşılmasına neden olabilir (Demuynck vd., 1984). Mikro ekonomik analize konu olan fizibilite çalışmasında, statik ve dinamik olmak üzere iki önemli yaklaşım söz konusudur.

Statik geri ödeme süresi hesabında, yatırım maliyeti, yıllık kazançlar, yıllık işletme maliyetleri, dış sermaye alım masrafları göz

önüne alınarak, yıllar itibariyle elde edilebilecek net kazançlar belirlenir. Yıllık olarak, tamir ve bakım harcamaları dahil işletme masrafları için, ilk yatırım maliyetinin % 1-3 oranı kullanılabilir (Demuynck vd., 1984; Werner vd., 1989; Anon., 1999d). Biyogaz sistemlerinin ekonomik ömrü 10–15 yıl olarak alınabilir. Analizler her iki ekonomik ömür için de yapılmalıdır. Statik kazanç hesabında ortalama sermaye yatırımı K_a ;

$$K_a = \frac{I_0}{2} \quad (2.10)$$

formülüyle bulunur. Burada I_0 ilk yatırım maliyetidir. Buradan yatırımın geri dönüş oranı I_g ;

$$I_g = \frac{N_p}{K_a} \cdot 100 \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Net yıllık getiri N_p ; yıllık kazançlar N_k , faiz giderleri i_g ve yıpranma kaybı Y_k olmak üzere,

$$N_p = N_k - i_g - Y_k \quad (2.12)$$

formülüyle elde edilir. Yıpranma kaybı Y_k ,

$$Y_k = \frac{I_0}{n} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplara alınır. Burada n yıl olarak sistemin ekonomik ömrüdür.

Dinamik modelde net bugünkü değer göz önüne alınır. Böylece yatırılan sermayenin alternatif getirileri de ele alınmış olur. Bunun için piyasa faiz oranı ve tahmin edilen enflasyon oranları kullanılarak iskonto oranına ulaşılır. İskonto oranı, değerlendirmelerde kritik rol oynamaktadır. Zamanlararası maliyet ve getirilerin bir noktada değerlendirilebilmesi için bu oran gereklidir. Gerçek değeri, nominal faiz oranından enflasyon oranı çıkarılarak bulunabilmektedir. Nominal faiz oranı o gün için geçerli olan uzun dönem borçlanma faizi olarak alınabilir (Anon., 2000c). İskonto oranı i ,

$$i = \frac{100 + p}{100 + a} \cdot 100 - 100 \quad (2.14)$$

formülüyle bulunur. Burada p piyasa faiz oranı (%), a beklenen enflasyon oranıdır (%). Yıllık kazançların net bugünkü değeri NPV , servis ömrü n , iskonto oranı i , yıllık kazanç N_p olmak üzere,

$$NPV = N_p \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} \quad (2.15)$$

formülüyle elde edilir. NPV , ilk yatırım maliyeti I_0 'dan büyükse, yatırıma karar verilir (Werner vd., 1989).

Ekonomik değerlendirmeye ilgili diğer bir yaklaşım, toplam enerji ihtiyacının göz önüne alınmasıdır. Toplam enerji ihtiyacı, ürünlerin veya hizmetlerin oluşmasında, ayrılan enerji kaynaklarının tümünü kapsamaktadır. Yani diğer bir deyişle üretim sırasında kullanılan tüm enerji kaynakları hesaplarda kullanılır. Genellikle bu değer MJ/kg olarak verilmektedir. Elektrik üretiminde bu birim MJ/kWh olarak alınmaktadır. Bu değer, aynı ürünler için üretim prosesinin verimine ve ülkeden ülkeye

değişiklikler göstermektedir. Biyogaz sistemi için bu değerlendirme yapılmak istendiğinde, enerji girişi tahminlenir ve enerji çıktısından çıkarılır. Enerji girdisi, fermentasyon öncesi için, atığın taşınması, hazırlanması, pompalanması ve reaktör sıcaklığına ısıtılmasından oluşur. Fermentasyon sırasında ise, reaktör ısı kayıplarının karşılanması ve karıştırma en önemli enerji girdileridir. Daha sonra ise biyogaz sisteminin ürünleri, biyogaz ve fermente gübre, enerji çıktısı olarak değerlendirilir (Winstrom-Olsen vd., 1977).

Bazı yararlar parasal olarak ifade edilemezler. Bu yüzden ekonomik analiz negatif çıksa dahi, sosyoekonomik yaklaşımda avantaj sağlayan yatırımların yapılabilmesi mümkündür (Werner vd., 1989). Biyogaz tesisleriyle enerji ve gübre üretiminin merkezi olmaktan çıkması, topluma kontrol, kar ve istihdam yönünden yararlar getirir. Yerel kuruluşlar tarafından yapılan üretim, daha çok yerel olarak harcanır ve ekonomik gelişimi hızlandırır. Küçük biyogaz sistemleri, herhangi bir destekleme söz konusu olmadığı zaman, ekonomik olarak karlı sistemler değildir. Orta ve büyük ölçekli biyogaz sistemleri daha karlı olmaktadır. Biyogaz sistemleriyle yakıt ve gübre üretimi, fosil yakıt ve kimyasal gübre üretim proseslerine göre daha emek yoğunudur ve bu yüzden de istihdam yaratma yetenekleri daha fazladır. Teknik, politik ve ekonomik şartlar, kurulacak tesislerin değerlendirilmesinde farklı yaklaşımların oluşmasına neden olur. Gelişmiş ülkelerde büyük ölçekli tesisler önemli olurken, gelişmekte olan ülkelerde küçük ve orta ölçekli tesisler daha yapılabilir olmaktadır (Arnott, 1985). Yine gelişmekte olan ülkelerde yoksulluk ve yerel yaşam şartlarında iyileştirmeler öncelik taşırken, gelişmiş ülkelerde global çevre kirliliği ön plana çıkmaktadır (Gruber ve Herz, 1996).

Gübreleme ve çevresel faydaların göz önüne alınmadığı, biyogazın sadece elektrik üretiminde kullanıldığı ekonomik analizlerde, biyogaz sistemi ekonomik yönden dezavantajlı çıkabilmektedir (Engler vd., 2002; Nielsen ve Hjort-Gregersen, 2002). Reaktörün bir sera içinde inşa edilerek ısı kayıplarının düşürülmesi, elde edilen biyogazın seranın ve hayvan barınağının enerji ihtiyacını karşılamada kullanılması, sıvı fermente gübrenin serada yetiştirilen bitkiler için, katı kısmın toprak şartlandırmasında ve yine elde edilen CO₂'nin sera içerisinde kullanılması gibi biyogaz sistemlerinin entegre olarak kullanılması, ekonomik olarak uygulanabilirliği artırmaktadır (Chen, 1997; Mengjie, 2002). Kurulan sistemlerin ekonomik değerlendirilmesinde, sistem kapasitesi arttıkça, gerek biyogaz sisteminin gerekse kojenerasyon sisteminin, kW başına ya da hayvan başına maliyeti düşmektedir (Jewell vd., 1986). Büyük sistemlerde, biyogaz tesisine yakın doğal gaz hattının bulunması ve kullanım fazlası ısının satılabileceği yerin bulunamaması, ekonomik yönden dezavantajdır (Trogisch, 2001). Özellikle süt kooperatifleri, süttozu elde etmek amacıyla süt kurutma için yüksek ısı enerjisine ihtiyaç duyarlar. Biyogaz bu amaçla kullanıldığında karlı olmaktadır (Krich vd., 2005). Ekonomik yaklaşımda sera gazı emisyonu göz önüne alındığında, biyogaz sistemlerinin kurulmasında kullanılan malzemelerin yapımı, taşınması sırasında kullanılan fosil yakıtlar ve yine inşaat ve tesisat yapımında kullanılan yakıtların oluşturduğu emisyonlar da göz önüne alınmalıdır. Toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık olarak % 80'i yatırım aşamasında oluşmaktadır. Hammadde ve fermente gübrenin nakliyesi sırasında ise % 3 emisyon yaratılmaktadır (Ishikawa vd., 2006). Biyogaz sistemlerinin işletilmesinde, enerji ihtiyacı, genellikle üretilen biyogazın % 20-80'ini aşmamaktadır (Murphy ve McKeogh, 2006). Fakat İsveç şartlarında yapılan bir araştırmada, hayvansal atıklar için, atığın temininde 200 km üzerinde bir nakliye söz konusu olduğunda, enerji kazanımının negatife dönebildiği rapor edilmiştir (Berglund ve

Börjesson, 2006). Ticari değeri olmayan, tezek ve bitkisel atıklar gibi yakıtların ya da düşük fiyatlı konvansiyonel yakıtların kullanıldığı yerlerde, biyogaz sistemleri ekonomik çıkmayabilmektedir. Bu durumda tamamen parasal yaklaşım yerine, diğer bütüncül pozitif etkilerin göz önüne alındığı yaklaşım daha olumlu olmaktadır. Biyogaz teknolojilerinin yaygınlaştırılmasında, politika yapıcılara, teknik elemanlara ve son kullanıcılara sistemleri tanıtmak önemlidir (Marchaim, 1992).

Biyogaz üretiminin yaygınlaşmasındaki en büyük sorunlardan biri, uygulamacıların bilimsel bilgiye sahip olmamaları, bilimsel araştırmacıların yoğun verilere ve bilgiye sahip olmasına rağmen bunları uygulamaya aktaramamalarıdır (Fischer ve Krieg, 2002a). Yine biyogaz kullanımının yaygınlaşmasındaki en büyük engel, yüksek yatırım maliyetleri ve düşük fosil yakıt fiyatlarıdır (Anon., 2002c). Özellikle, biyogaz sistemlerinin tasarruf tabanlı getirileri, ek ve parasal kazanç beklentisi içinde olanlara cazip gelmemektedir (Alwis, 2002). Biyogaz uygulamalarının yaygınlaştırılması için ülkeler bazında yapılan çalışmalar, şu uygulamaları içermektedir:

- Uygun tesislerin ve uygulamaların geliştirilmesi,
- Teknoloji ve yönlendirme servislerinin kurulması,
- Kullanıcılara sürekli destek sağlanması,
- Uygulamacıların eğitimi,
- Reklam ve destekleme faaliyetleri,
- Özel teknisyenlere destek verilmesi,
- Finansal destek sağlanması (Werner vd., 1989).

Biyogazın yaygınlaştırılabilmesi için, Maliye Bakanlığı destek, teşvik ve uygun kredilerle, Enerji Bakanlığı, biyogazdan üretilen

elektriğin şebekeye verilmesini ve kullanılmasını yasal olarak sağlayarak, Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı kurslar ve tanıtım faaliyetleri düzenleyerek, Milli Eğitim Bakanlığı öğretim müfredatına biyogaz sistemlerini koyarak, Sağlık Bakanlığı pilot uygulamalar gerçekleştirerek destek vermelidir (Anon., 1999b). Fosil yakıtların ve kimyasal gübrenin bol ve ucuz olduğu ülkelerde, biyogaz teknolojilerine olan istek daha az olmaktadır. Biyogaz teknolojilerinin kabul edilmesinde ve kullanımının yaygınlaştırılmasında önemli etkenlerden birisi de çiftçilerin gelir düzeyidir. Orta ve yüksek gelirli çiftçilerde adaptasyon oranı, düşük gelirli çiftçilerden çok daha fazla olmaktadır. Sistem kurulum ve işletim maliyetleri buna neden olmaktadır. Biyogaz teknolojilerinin yaygınlaşmasında, ekonomik durum, gübre ve enerjinin piyasa durumu, biyogaz sisteminin ürünlerine olan ihtiyaç, uygun biyogaz teknolojisi, yeterli ve sürekli hammaddenin bulunması, teknik bilgi ve destek durumu, içsel motivasyonda önem taşımaktadır (Ni ve Nyns, 1996). İsveç'te biyogazla çalışan araçları özendirmek için akaryakıt vergisi ve diğer vergi muafiyetlerinin yanı sıra, bu araçların park ücreti de kaldırılmaktadır (Anon., 2000e). Çin'de, normalde % 17 olan KDV, biyogazla ilgili çalışmalarda %13, %33 olan gelir vergisi ise % 15 olarak uygulanmaktadır (Junfeng vd., 2002).

Merkezi biyogaz tesislerinin yaygın olduğu Danimarka'da, 1m^3 biyogazın üretim maliyeti 1984 yılında 2,94 \$'ken, 1996 yılında 0,28 \$'a düşmüştür. Biyogaz birim fiyatındaki düşüş, teknik, biyolojik ve organizasyonel öğrenme sonucunda ve sistem büyüklükleriyle oluşmuştur. 1990 yılından sonra, üretim maliyetlerindeki düşüş durmuş olarak görünmektedir. Bunun nedeni teknolojik gelişmenin durmasında değil, biyogaz için gerekli atıkların sınırlı olmasındadır. Atık piyasası bu duruma tepki göstermiş ve maliyetlerin daha fazla düşmesini engellemiştir. Aynı zamanda biyogaz üretimi 0'dan 3,5 milyon m^3 'e çıkmıştır. Biyogaz sistemleri 1996'da, Danimarka'nın CO_2 emisyonunun

% 0,1 düşürülmesini sağlamıştır. Atıkların toplanması ve bertarafı sırasında oluşan metan emisyonunun azalması, suni gübre için gerekli enerjiden tasarruf sağlanması, özellikle gübrenin taşınması için gerekli enerjinin azaltılması gibi diğer etkiler de göz önüne alındığında, CO₂ emisyonunun % 0,3 düşürüldüğü görülmektedir. Bu gelişmede çok farklı aktörler rol almıştır. İlk biyogaz tesisinde, reaktör içinde kum oluşumu, reaktör kontrolündeki zorluklar, atık fazlalığı gibi sorunlar, iyimser bakışı zedelemiş, biyogaz sistemlerinin kurulmasını destekleyenler vazgeçmeye başlamıştır. Fakat devlet desteği bu noktada önemli aktör olmuştur. O dönemde biyogaz sistemleri için hazırlanan iki rapor birbiriyle çelişmektedir. Birinci raporda çevresel etkiler göz ardı edilmiş ve bu sistemlerin sosyo-ekonomik olarak uygulanabilir olmadığı sonucuna varılmıştır. Aynı raporda, çevresel etkiler içerildiğinde dahi aynı sonuca ulaşılmıştır. İkinci raporda, ithal edilen petrolün azalışı, işsizliğin azalışı, gelir artışı ve buna bağlı olarak devletin finansmanında sağlanacak gelişmeler göz önüne alınmıştır. Böylece biyogaz sistemlerinin yaygınlaşmasının, sosyo-ekonomik olarak oldukça uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Bu analizde, hayvansal atıkların % 50'sinin biyogaz üretiminde kullanıldığı göz önüne alınmıştır (Maeng vd., 1999).

Biyogaz sistemlerinin Danimarka'daki gelişimi incelenirken, tüm maliyetler, işgücü, ithalat ve atık maliyetleri olmak üzere 3'e ayrılmıştır. Maliyetler içinde işgücünün payı 0,66, ithalatın payı 0,16 ve atık maliyetlerinin payı 0,18'dir. Gelişim süresince yılda 4200 kişiye istihdam sağlanmıştır. Araştırma, geliştirme ve pilot tesis kurumunun maliyeti 77 milyon dolar olmuştur. Yakıt vergisinden kayıp 72,8 milyon dolar, istihdam yaratmaktan gelen gelir 56 milyon dolar, kişisel vergilerden gelen gelir 33,6 milyon dolardır. Tüm bunlara göre devletin katkısı 60,2 milyon dolardır. Bu gelişimde birey başına 12 dolar maliyet oluşmuştur (Maeng vd., 1999).

Küçük ölçekli tesislerin yaygın olduğu Hindistan'da kurulu olan biyogaz sitemlerinin geri ödeme süresi, yapılan analizlerde, yaklaşık 5 yıl olarak hesaplanmıştır. Sistem ömrünün 15-20 yıl olarak kabul edilmesi durumunda, biyogaz sistemlerinin ekonomik yönden çekici olduğu görülmektedir. Fakat bu hesaplamalarda sadece biyogaz ve gübrenin finansal getirileri ele alınmış, prosesin % 100 kapasitede çalıştığı varsayılmıştır. Bu analizlerde, emek yoğun çalıştırılan, günlük 2 m³ biyogaz üretim kapasiteli, 7 m³ hacimli biyogaz reaktörünün işletilmesi için, 50-70 dakika günlük çalışma gerektiği rapor edilmiştir (Gustavsson, 2000). Yapılan analizler, ülke ve bölge şartlarına, analize dahil edilen parametrelere ve göz önüne alınan önceliklere göre, çok farklı sonuçlara ulaşabilmektedir.

2.20 Biyogaz Sistemlerinin Çevresel Etkileri

Biyogaz üretiminde kullanılan organik materyaller, kullanılmamaları durumunda zararlı ve hastalık yapıcı etkiye sahiptir (Arnott, 1985). Ayrıca bu materyallerin doğrudan kullanımı, toprakta ve yeraltı sularında nitrat kirlenmesine yol açar. Domuz atıkları yüksek oranda bakır ve çinko gibi ağır metaller içerir ve kirliliğe yol açar. Bu atıklar sinek ve koku oluşumuna neden olur (Boyd, 2000). Biyogaz sistemleri, bu atıklara bağlı olarak oluşan çevre kirliliğinin büyük ölçüde azalmasını sağlar (Dennis ve Burke, 2001). Biyogaz sistemlerinde, besleme materyalinde bulunan organik katı maddenin yaklaşık % 50'si giderilmektedir. Bu oran bazı sistemlerde % 80-90'a kadar çıkabilmektedir (Brown, 1994). Anaerobik fermentasyon sırasında organik kirleticiler azaltılır, fakat tamamen giderilmezler. Fermente gübre içerisinde inorganik tuzlar, H₂S iyonları, amonyak ve ağır metaller, hammaddenin içeriğine ve reaktör verimine göre değişmek kaydıyla bulunabilir (Anon., 1980a).

Tarımsal uygulamalardan kaynaklanan sera gazı emisyonu, toplam emisyonun yaklaşık % 20-35'ini kapsamaktadır. Hayvansal kökenli metan emisyonunun geviş getiren hayvanlarda % 80'i sindirim sisteminden kaynaklanırken, domuz ve tavukta % 70'i atıklardan kaynaklanmaktadır (Monteny vd., 2006). Sera gazı etkisi yönünden biyogaz sistemleri iki önemli etkiye sahiptir. Öncelikle hayvansal atıkların depolanması sırasında ortaya çıkan ve CO₂'den 21 kez daha fazla etkili olan metan emisyonunun azaltılmasını sağlar. İkinci olarak, elde edilen biyogazın enerjiye çevrilmesiyle, yerine kullanıldığı fosil yakıtların neden olacağı CO₂ emisyonunun düşürülmesi söz konusudur. 1 kg Metan emisyonunun azaltılması, 25 kg karbondioksit azaltılmasıyla eşit etkiye sahiptir. Metan sadece kızıl ötesi ışıınımı absorblamakla kalmaz, aynı zamanda fotokimyasal reaksiyonlarla karbondioksit, ozon ve su buharı gibi sera gazlarının üretimine de neden olur (Chynoweth, 1996). Metan moleküllerinin atmosfer içerisindeki ömrü yaklaşık olarak 10 yıldır. Bu yüzden metan emisyonunun kontrolü kısa zamanda sonuç verebilir (Maekawa, 1999). Metan emisyonunun yaklaşık % 42'si bataklıklar, tatlı ve tuzlu su çökeltileri ve tundralardan, % 20'si çeltik tarlalarından, % 13'ü geviş getiren hayvanlardan, % 8'i biyokütlenin yakılmasından, % 8'i deponi alanlarından, % 6'sı doğal gaz ve petrol üretiminden, % 3'ü de kömür işletmelerinden kaynaklanmaktadır (Chynoweth, 1992). Hayvansal atıkların meydana getirdiği metan emisyonu, toplamın % 6-10'u arasındadır (Burton ve Turner, 2003). Biyogaz üretimi yoluyla metan emisyonu, dünya genelinde % 4, yani 13,4 milyon ton azaltılabilir (Anon., 2000c; Martin, 2003; Weiske vd., 2006). Hayvansal atıkların biyogaz sistemlerinde kullanılmadığı durumlarda, özellikle geviş getiren hayvanların beslenmesinde kullanılan yeme, monensin gibi katkı maddeleri ilave edilir. Bu durumda hayvanların sindirim sisteminde etki az olurken, atığın depolanması sırasında metan emisyonu önemli miktarda azalmaktadır (Mwenya vd.,

2006). Biyogaz üretimiyle CO₂ emisyonu, 420 milyon ton azaltılabilir. N₂O ise çevresel değişimlerde, CO₂'den 310–320 kez daha fazla tehlike taşımaktadır. Biyogaz üretimi sayesinde bu emisyon, dünya genelinde % 10, yani 49 bin ton azaltılabilir (Anon., 1999d; Klingler, 2000; Amon vd., 2006a). Bundan başka, azalan kimyasal gübre ihtiyacına bağlı olarak, üretiminde meydana gelen CO₂ miktarı da azaltılmış olmaktadır (Anon., 2000c).

Deponi alanlarında oluşan yaklaşık % 55 CH₄ ve % 45 CO₂ bileşimine sahip biyogaz atmosfere verildiğinde, 9,19 kgCO₂/Nm³'e eşit sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Bu gaz yakıldığında emisyon değeri, 1,96 kgCO₂/Nm³ değerine gerilemektedir (Murphy ve McCarthy, 2005). Bir dizel motorda biyogaz kullanılması halinde, CO₂ emisyonu yaklaşık % 85 azalmaktadır (Karthä, 2001). Fakat biyogaz içerisinde amonyak miktarının fazla olması, NO_x emisyonuna neden olabilmektedir. Özellikle termofilik reaktörlerde, çözünümün sıcaklıkla azalması nedeniyle, biyogaz içerisindeki amonyak miktarı artabilmektedir. Sisteme müdehale edilmesi metan miktarını da etkileyeceği için, biyogazın amonyaktan arıtılması daha pratik olmaktadır (Strik vd., 2006). Atıklardan oluşan amonyak emisyonunun engellenmesi amacıyla, fermente gübrenin depolandığı açık havuzların üzeri, talaş gibi su üzerinde yüzen malzemeler kullanılarak kapatılmaktadır. Fakat metan emisyonunu bu çözüm engellememektedir (Amon vd., 2006a). Fermente gübreden kaynaklanan metan ve amonyak emisyonu yaz aylarında sıcaklık yükselmesine bağlı olarak artarken, N₂O emisyonu çok az değişmektedir (Clemens vd., 2006).

2.21 Kırsal Ve Bölgesel Kalkınmada Biyogaz Sistemlerinin Rolü

Kalkınma ya da gelişme, dolaylı kültürel, ekonomik, siyasal ve bilimsel alanda yapısal değişimleri betimler. Bu yüzden ancak disiplinlerarası bir yaklaşımla ele alınabilir. Kendiliğinden ve/veya planlı-uyarılmış şekilde gerçekleşir. Kırsal kalkınma, sürdürülebilir kalkınma ve çevresel kalkınma gibi alt grupları kapsar. Kırsal kalkınma, küçük ölçekli çiftlik sahiplerini, kiracıları ve topraksız köylüleri ilgilendirir. Kırsal kalkınma stratejileri, düşük gelirli kırsal kesim kadın, erkek ve çocuklarının kazanımlarını hedeflemelidir. Çevresel kalkınma aynı stratejik hedeflere sahip olsa da, odaklandığı bakış açısı çevresel etkilerdir ve ekonomik kalkınmanın çevresel etkilerinin olumlu olmasını hedefler. 80’li yıllarda ortaya çıkan sürdürülebilir kalkınma, bu stratejiyi kapsamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma stratejisi, günümüz insanların ihtiyaçlarıyla, gelecekte yaşayacak insanların ihtiyaçlarını uzlaştırmaya çalışmaktadır. Bu yüzden global bir yaklaşım gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yaygınlaştırılması, bu stratejinin önemli bir parçasıdır. Teknoloji, fiziksel alet ve yapıları içerdiği gibi, programlar ve organizasyon bilgisi gibi fiziksel olmayan varlıkları da içerir. Ayrıca işgücü ve yetenekler de aynı kavram içerisindedir. Bu yüzden biyogaz teknolojilerine yaklaşımda, gübrenin kimyasal özellikleri kimyasal ve biyolojik yaklaşımla, su miktarı ve viskozitesi fiziksel yaklaşımla ele alınırken, hayvanların yetiştirilmesi ve atıklarının toplanmasında sosyal-kültürel alışkanlıkların da göz önüne alınması gerekir. Uygulanacak programlarda disiplinler arası yaklaşım şarttır (Gustavsson, 2000).

Sosyal ve çevresel yararlarına rağmen, özellikle küçük ölçekli çiftlik tipi biyogaz tesisleriyle ilgili başarısızlıklar ve

memnuniyetsizliklerle geniş ölçüde karşılaşmaktadır. Bunun nedeni, genellikle kurulan tesislerin yerel şartlar göz önüne alınmadan, en uygun tesis belirlenmeden uygulamaya geçirilmesidir (Santerre ve Smith, 1982). Yaygınlaştırmanın başlatılmasında, bölgenin yapısı, yollar ve ulaşım-iletişim imkanları incelenmelidir. Sistemin kurulmasında, işletilmesinde ve tamir/bakımında, lokal malzeme sağlayıcıları ve bulunmayan malzemelerin temin imkanları araştırılmalıdır. Bölgesel etnik ve sosyo-ekonomik yapı çözümlenmelidir. Mevcut ve potansiyel ürünlerin kullanımı ve satışını da içeren pazar araştırması yapılmalıdır. Yapılabilirlik analizi yapılmalı ve uygulanacak prosedür belirlenmelidir. Farklı bölgelerde pilot uygulamalara başlanıp, en uygun sistemlerin belirlenmesine çalışılmalıdır. Yerel birliktelikler tesis edilmelidir. Özellikle son kullanıcılar, teknisyenler, mühendisler, danışmanlar, finans kuruluşları ve politik karar vericilere yönelik olarak, tanıtım ve kurslar başlatılmalıdır. Seminerler ve iş kursları düzenlenmeli, eğitim çalışmaları, broşürler, kullanım kılavuzları, gösterim modelleri, resimli materyaller, radyo ve televizyon programları ile desteklenmelidir. Uygulamaların ve yaygınlaştırmanın devam etmesini sağlayacak ne kadar vasıflı ve istekli elemana sahip olduğu tespit edilmelidir. Doğru bir yaygınlaştırma programı, bölgesel iş yapısını göz önüne alarak kurulabilir. Düzenlenecek eğitimler yerel dilde gerçekleştirilmelidir. Eğitim verilecek her gruba uygun materyal sağlanmalıdır. Bu yüzden, basılı materyaller tekrar düzenlenebilir şekilde olmalıdır. Kurulacak pilot tesisler, bölge için kullanımı uygun tipte olmalıdır. Eğitimler uygulamaları içermelidir. Parasal desteklemeler veya malzeme temini gerekli olabilir. Fakat bunların pazar fiyatlarında çarpıklığa ve sermayenin yanlış yöne yatırılmasına neden olabileceği unutulmamalıdır (Werner vd., 1989).

Biyogaz sistemlerinin kırsal kesimde yaygınlaştırılmasında, çeşitli engeller vardır. Yapım malzemelerindeki kısıtlılık ve pahalılık, tüm organik materyaller yerine, sadece hayvansal ve bir kaç bitkisel atıkla çalışılması, biyogaz üretiminde düzensizlik ve sorunlar, biyogazın arıtılmasında ve kullanılmasında yaşanan zorluklar ve harcamalar gibi teknik engeller yanında çevresel baskılar da söz konusudur. Teorik yararların aksine, uygulamada yararlar büyük oranda çevresel faktörlere bağımlıdır. Örneğin, psikolojik olarak insan ve domuz atığıyla çalışmak, bazı toplumlarca benimsenememektedir. Yaşam tarzlarında, pişirme yöntemlerinde ve gübre kullanımında olduğu gibi, değişiklikler, toplumsal direnç görebilmektedir. Ayrıca fakir kesimde serbestçe kullanılabilen sığır atığı ve bitkisel atıklar ya da odunlar önemli yer tutarken, sığır atıklarının kullanılamaması, oduna olan talebi artırabilir. Çevresel etkilerde özellikle ormansızlaştırma önemli bir yer tutmaktadır. Ama yukarıda bahsettiğimiz nedenden dolayı biyogaz üretiminin yaygınlaştırılması, bu etkiyi azaltmak yerine, artırabilir. Kırsal kesimde işsizlik yüksektir ve yakacak odun toplamak için harcanan vaktin biyogaz üretimiyle azalması, kırsal kesim yaşayanları için, özellikle de odunun maddi külfetinin olmamasından dolayı, bir önem taşımamaktadır. Her ne kadar anaerobik fermentasyon patojenlerin ve zararlı tohumların çoğunu giderse de, düşük bekletme zamanı ve yetersiz karıştırma sonucunda yine de çevreye zarar verilebilmektedir (Vijayalekshmy, 1985). Kırsal kesim biyogaz tesislerinin bakım ve onarım için yalıtılmış bölgelerde bulunması, ailelerin kısıtlı bütçesi ve ekonomik olarak yeterli atığa sahip olmamaları, yaygınlaşmanın önünde engel oluşturmaktadır (Madeley, 1981). Kırsal kesimde biyogaz sistemlerinin yaygınlaşması önündeki engellerden biri de, bilinmeyene karşı oluşan korkudur (Akinbami vd., 2001). Biyogaz sistemlerinin yaygınlaştırılmasında, bu sistemlerle karşılaşacak bölgenin özel koşulları göz önüne alınmalıdır. Son kullanıcıların, konuyla ilgili tartışmalara dahil edilmesi gerekir. Program,

hedef kitlenin temsilcileriyle birlikte düzenlenmelidir. Hedef kitle gelişmelerden sürekli haberdar edilmelidir. Güvenilir ve sağlam bürolar oluşturulmalıdır. Biyogazın kullanımında ve atıkların hazırlanmasında isteklilik göz önüne alınmalı ve gerekirse özendirilmelidir. Biyogaz tesislerinin olumlu yönleri tanıtılmalıdır. Tesisleri işletecek olanlar ve yararlanacak olanlarla özdeşleşilmelidir. Doğru işleyen, sağlam ve güzel görünen tesislerle yaygınlaştırma çalışmalarına başlanmalıdır. Biyogazla çalışan, sorunsuz, ucuz ve modern cihazların uygulamalarına öncelik verilmelidir. Tesisin ve kullanılan cihazların, son kullanıcılar tarafından rahat kullanımlı olmasına dikkat edilmelidir. Kullanılan tüm malzemeler, garantili ve gerekirse sigortalı olmalıdır. Yedek parça garantisi mutlaka verilmelidir. Hayvanların sabit ahırlarda bakımına eğilim artırılmalıdır. Zaman tasarrufu ve verimlilik yönünden, biyogaz tesislerinin hayvan barınaklarına bağlantılı ya da yakın olmasına özen gösterilmelidir. Fermente gübrenin kullanımına olan isteklilik artırılmalı, kullanımdan doğan pozitif etkiler, elde etme, depolama ve kullanma şekilleri hakkında bilgilendirme yapılmalıdır. Bu kullanımla ilgili uygun, ucuz sistemler geliştirilmeli ve kullanıma sunulmalıdır. Finans ve işgücü açısından makul fiyatlar sunulmalıdır. Kullanıcılar için, gerçekçi ve sadece parasal yaklaşımı içermeyen, uygun maliyet-fayda oranı ortaya konmalıdır. Uygun finansal destek ve krediler sağlanmalıdır. Özellikle daha az koku, daha az sinek, daha düzgün görüntü ve modern ekipmanların kullanımı, yapay aydınlatmanın geliştirilmesi, iş yükünün verimli bir şekilde düşürülmesi, sürekli ve tüm enerjinin biyogazdan sağlanması gibi yönlerden, yaşama şartlarında gerçekleştirilebilecek iyileştirmeler yeterince anlatılmalıdır. Son kullanıcılarla bu tesisleri yaygınlaştırma çalışmalarını yürütenler arasında yoğun ilişki kurulmalı, yaygınlaşmanın engellenmesine neden olabilecek açıklar önceden tespit edilerek zamanında önlemlerin alınması sağlanmalıdır (Werner vd., 1989).

Ekonomik yatırımlar, finansal bir getiri ve tasarruf sağlamayabilir, fakat yaşam ve çalışma şartlarının iyileşmesi gibi etkileri olabilir. Kırsal kesimde kullanımı yaygınlaşan gelişmiş sobalar, güneşli pişiriciler bu madde içerisinde betimlenebilir. Bu kesimde yaşayanların gelirleri düşüktür ve enerji ihtiyaçlarını topladıkları biyokütle ile giderirler. Bu da onlar için parasal maliyet taşımamaktadır (Gustavsson, 2000). Kırsal kesimde küçük çiftlik sahipleri için biyogaz tesisine yatırım yapmak kısıtlı bütçeleri nedeniyle oldukça zor olmaktadır. Ayrıca bu aileler borçlanma konusuna olumsuz yaklaşmaktadırlar. Bu yüzden finansal kredi sağlarken dikkatli olunması gerekir. Bu tip bir girişimden önce mevcut alternatiflerin araştırılması gerekir. Ailelerin ne kadar borçlanabilecekleri, sosyo-ekonomik analizle tespit edilmelidir. Daha sonra kırsal kalkınma fonları ve olası banka kredileri açıklıkla onlara anlatılmalıdır. Uygulamalar başlatıldığında, kalkınma fonundan bir teminat hesabı bankalar nezdinde açılmalı ve bankaların biyogaz projeleri için bu teminat koşullarında kredi vermesi sağlama alınmalıdır. Bu krediler doğrudan kullanıcılara verilmemeli, yaygınlaştırma büroları aracılığıyla verilmelidir. Bu kurum krediyi nakit olarak değil malzeme ve işçilik yoluyla, inşaat aşamalarına uygun olarak dağıtılmalıdır. Geri ödemeler, bu kurum ve kalkınma bankaları denetiminde gerçekleştirilmelidir. Toplam kredi miktarının yaklaşık olarak % 10'u oranında tutulan garanti fonu, geri ödenmeme durumunda devreye sokulmalıdır. Bu garanti fonu, enflasyon ve ekonomik krizler göze alınmadan hesaplandığından, borçluların sadece bir bölümüyle tükenebilir. Bu durumun üstesinden, orta veya uzun vadede kredi birlikleri kurularak gelinebilir (Werner vd., 1989). Devlet tarafından sağlanan karşılıksız veya düşük faizli kredilerin ileriye yönelik beklentileri artırarak bağımlılığa neden olabileceği göz önüne alınmalı, uygun olmayan projelere destek verilmesinin istekli girişimciler üzerinde oluşturabileceği zararlar ön görülmelidir (Reddy, 2004).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Biyogaz üretimiyle ilgili denemelerde ve laboratuvar çalışmalarında besleme materyali olarak, Yaşar Holding’e bağlı Çamlı Yem Besicilik Sanayi ve Tic. A.Ş.’ den temin edilen taze sığır atığı sulandırılarak kullanılmıştır. Kullanılan sığır atığının bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Analizler Çamlı Yem Besicilik Sanayi ve Tic. A.Ş. Organik Gübre Kalite Kontrol Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 Taze Sığır Atığının Bazı Özellikleri

% Nem	77.32
% Kuru Madde	22.68
pH (1/5)	8.06
E.C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1934
% Toplam Tuz	1.23
% Organik Madde	79.84
% Ham Kül	20.16
% Organik Karbon	50.53
C/N	21.96
% Toplam Azot	2.3
% Toplam Fosfor (P_2O_5)	2.8
% Toplam Potasyum (K_2O)	3.5

3.2 Pilot Ölçekli Biyogaz Üretimi Denemeleri

Pilot ölçekli denemeler, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Biyokütle Enerjisi Araştırma Laboratuvarında bulunan iki ayrı biyogaz sisteminde gerçekleştirilmiştir. Sistemlerden biri 280 lt, diğeri 5 m³ kapasiteye sahiptir.

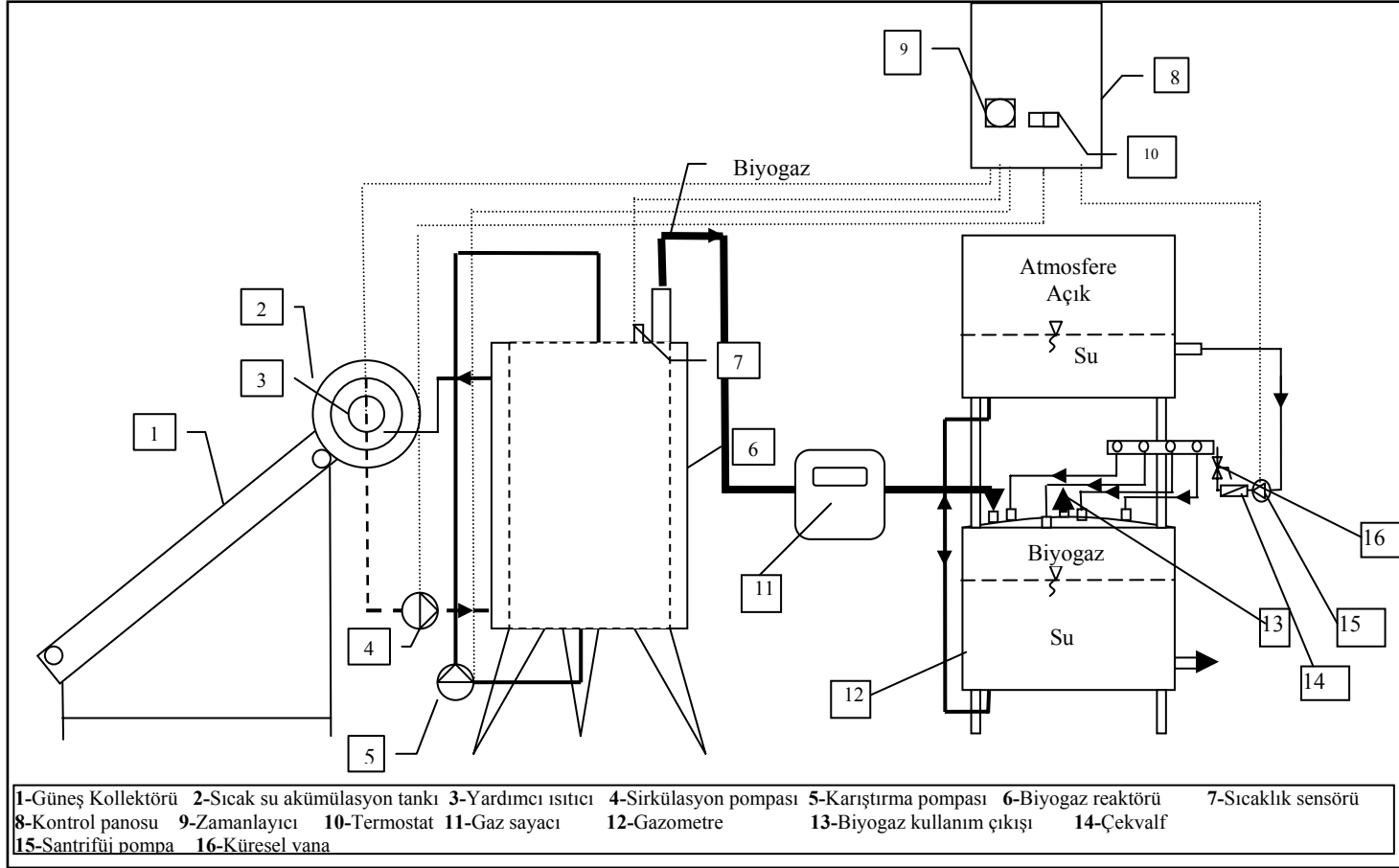
3.2.1 Güneş Enerjisi Destekli, 0,28 m³ Kapasiteli Biyogaz Sistemi

Denemelerde kullanılan 0,28 m³ hacmindeki sürekli beslemeli tip reaktör ısı ceketli tip ısıtma sistemine sahiptir. Fermentasyon bölgesi tamamen AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir. Reaktörün ısıl izolasyonu 10 cm kalınlığında cam yünüyle yapılmış ve çevresi 0,5 mm kalınlığında alüminyum levha ile kaplanmıştır. Yine tüm borular cam yünü ve alüminyum sac ile izole edilmiştir. Gazometre olarak, su yer değiştirmeli tip gazometre kullanılmıştır. Gazometrenin hacmi 0,5 m³'dür ve iç kısmı epoksi kaplı çelik sacdan üretilmiştir. Isıtma sistemi olarak, 0,18 m³, ceketli tip ısı eşanjörüne sahip sıcak su akümülayon tanklı güneş enerjisi sistemi kullanılmıştır. Sistemde iki adet seçici yüzeyli düzlemsel bakır güneş kollektörü bulunmaktadır. Sıcak su akümülayon tankına, güneş enerjisinin yetersiz olduğu zaman kullanılmak üzere yardımcı ısıtıcı olarak 2000 W gücünde elektrikli rezistans monte edilmiştir. Sistemin otomasyonu kontrol panosuyla sağlanmıştır. Karıştırıcının otomasyonunda zaman saati, ısıl stabiliteyi sağlamak için ise dijital termostat ve ıslak rotorlu sirkülayon pompası kullanılmıştır. Yine yardımcı ısıtıcının otomasyonunda ayrı bir dijital termostattan yararlanılmıştır. Güneş enerjisi sistemi doğal dolaşımli olup, otomasyona ihtiyaç duymamaktadır. Isıtma sisteminin tümünde, ısı taşıyıcı akışkan olarak su kullanılmıştır. Güneş enerjisi sisteminin

kolektörle ısı ceketindeki kapalı çevrimine, antifriz ilavesi yapılmıştır. Sistem parametrelerinin takibi için dataloger kullanılmıştır. Sıcak su akümülayon tankı giriş ve çıkış sıcaklıkları, kolektör giriş, çıkış ve yüzey sıcaklıkları, reaktör sıcaklığı, iç ve dış sıcaklıklar sürekli olarak kaydedilmiştir. Gaz üretimi kuru tip gaz sayacı ile ölçülmüştür. Üretilen biyogaz, 0,5 m³ hacimli gaz depolama tankında toplanmıştır. Karıştırma kauçuk loblu pompa ile sağlanmıştır. Sistemin enerji tüketimi dijital elektrik sayacıyla sürekli olarak takip edilmiştir. Sistem görünümü Şekil 3.1’de, akış şeması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Güneş enerjisi destekli sürekli tip biyogaz sisteminin görünümü



Şekil 3.2 Biyogaz sisteminin şematik gösterimi

3.2.2 5 m³ Kapasiteli Pilot Ölçekli Biyogaz Sistemi

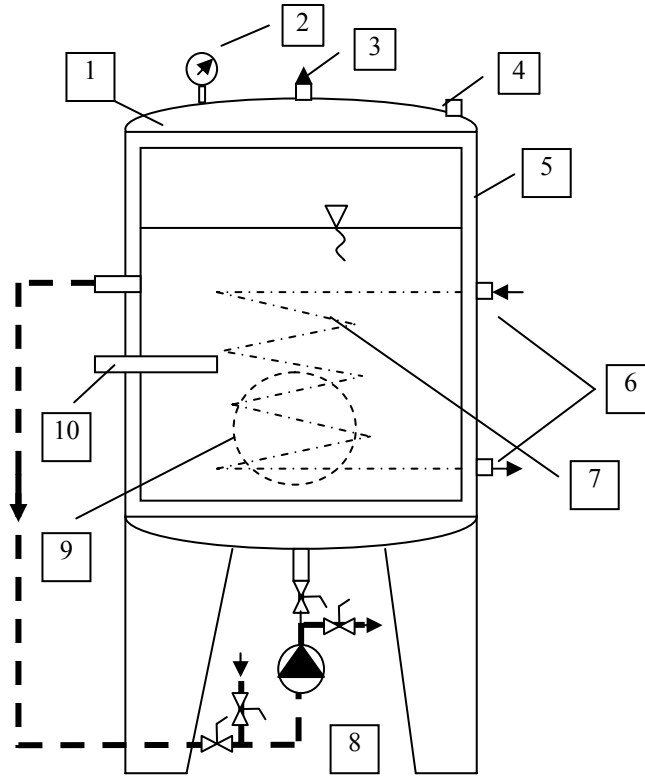
Denemelerde kullanılan pilot ölçekli biyogaz sistemi, 5 m³ hacimli biyogaz reaktörü ve gazometre, besleme materyali aktarma ve hazırlama ünitesi, besleme ve boşaltma tanklarından oluşmaktadır. Reaktör başlangıçta polietilen malzemeden üretilmiş, reaktör ısı ihtiyacı yerden ısıtma borularıyla sağlanmıştır. Reaktörün üzeri ısı yalıtımı amacıyla 10 cm kalınlığında cam yünüyle izole edilmiş, çevresi alüminyum sac ile kaplanmıştır. Reaktörün izolasyonsuz ve izolasyonlu hali Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 Polietilen reaktörün yalıtım yapılmadan ve yapıldıktan sonraki görünümü.

Denemeler sırasında, 150 mbar basınç seviyelerinde çeşitli deformasyonlarla karşılaşmış, gerek sıvı gerekse gaz kaçakları giderilememiştir. Ayrıca yapılan tamir çalışmaları sırasında, polietilenin kaynağında problemle karşılaşmıştır. Kaynak malzemesi ile gövde malzemesi içeriğindeki küçük bir farklılaşma, kaçağa neden olmaktadır. Ayrıca pozitif basınç altında gövdede genleşme oluşmuş, bu nedenle reaktörün alt kısmı yerden yaklaşık olarak 4 cm yükselmiştir. Bu sorunun silindirik yüzeye metal atkı atılarak çözülebilmesi mümkündür. Fakat bu çözümden yatırım maliyetinde artışa neden olacağı için vazgeçilmiştir.

Bu nedenlerden dolayı, fiberglass malzemenin reaktör ve gazometre yapımında kullanılmasına karar verilmiştir. Dizayn edilen ve üretilen yeni reaktörün şematik gösterimi Şekil 3.4’de, resmi Şekil 3.5’de verilmiştir.



1- Reaktör	2- Manometre	3- Biyogaz çıkışı	4- Gaz örnekleme portu
5-İzolasyon	6- Isıtma devresi	7- Serpantin	8- Karıştırma pompası
9- Temizleme kapağı	10- sıcaklık probu		

Şekil 3.4 5m³ hacimli fiberglass biyogaz reaktörünün şematik gösterimi

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, reaktör yalıtımlı olarak imal edilmiştir. 5 cm cam yününün üzeri tekrar fiberglass malzeme ile kaplanmıştır. Isıtma amacıyla reaktörün iç kısmına, 1” çap, 20 m uzunluğa sahip, epoksi boyalı çelik borudan serpantin monte edilmiştir. Karıştırma ve

besleme-boşaltma amacıyla kauçuk loblu pompa kullanılmıştır. Pompanın hidrolik değerleri, debi Q : 1,5 m³/h, basma yüksekliği H : 20mSS olarak seçilmiştir.



Şekil 3.5 5 m³ kapasiteli fiberglass biyogaz reaktörü

Sistem, reaktör dışında, 5 m³ hacimli, su yer değiştirmeli gaz depolama tankı (Şekil 3.6-a), besleme materyali aktarım organı (Şekil 3.6-b), karıştırıcılı besleme materyali hazırlama ünitesi (Şekil 3.6-c) ve reaktörün ısıtılması amacıyla kullanılan 20000 kcal/h gücünde, biyogazla çalışan kombiden (Şekil 3.6-d) oluşmaktadır. Gaz depolama tankı fiberglass, besleme materyali aktarım ve hazırlama üniteleri çelik malzemeden üretilmiştir. Hazırlama ünitesi 1,5 kW, aktarım ünitesi 0,75 kW gücünde, redüktörlü elektrik motoruna sahiptir. Kombi LPG’li olarak temin edilmiş, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.6 Biyogaz sistemini oluşturan parçalar:

- (a) Biyogaz depolama tankı,
- (b) Besleme materyali aktarım ünitesi,
- (c) Besleme materyali hazırlama ünitesi,
- (d) Biyogazla çalışan kombi.

3.2.3 Biyogaz Üretim Denemeleri

Biyogaz üretim denemeleri, yukarıda betimlenen pilot ölçekli sistemlerde, sürekli ve kesikli besleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Mezofilik (37 °C) ve termofilik (55 °C) bölgelerde çalışılmış, reaktör verimleri çıkarılmaya çalışılmıştır. Sürekli beslemeli deneme, 280 lt kapasiteli biyogaz sisteminde, kesikli beslemeli deneme ise 5 m³ kapasiteli biyogaz sisteminde yapılmıştır. Bunun nedeni, 5 m³ kapasiteli sistemin sürdürülmesi için gerekli olan günlük hayvansal atığın teminindeki zorluklardır.

Sürekli beslemeli denemede, sistem % 12 TK oranında olacak şekilde sulandırılan taze sığır atığı ile doldurulmuş, deneyin 15. gününden itibaren sürekli besleme, günde bir defa olmak üzere başlatılmıştır. Karıştırma pompasında meydana gelen arıza nedeniyle 17. günde kesilen beslemeye, daha sonraki 12 gün boyunca aralıklı olarak devam edilmiştir. Sistem 35. günden itibaren kesikli rejime alınmıştır. Bu rejim 81 gün sürdürülmüş, bu süre boyunca sisteme madde giriş ve çıkışı durdurulmuştur. Gaz üretiminin neredeyse tamamen durduğu 116. günden itibaren beslemeye tekrar başlanmış, besleme miktarı kademe kademe artırılarak 130. günde mezofilik bölge için, bekletme süresi 20 gün olacak şekilde normal miktara getirilmiştir. Besleme bu rejimde 25 gün sürdürülmüş, 155. gün sistem ani olarak termofilik bölge sıcaklığına (55 °C) ısıtılmıştır. Bu günden itibaren, sistemin tekrar dengeye geldiği 20 gün boyunca besleme yapılmamış, 176. günden sonra kademeli olarak besleme artırılarak, termofilik bölge için, bekletme süresi 12 gün olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Biyogaz üretim veriminin termofilik bölge için istenen seviyeye (2 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün) gelmesinden sonra, 194. günde deney sonlandırılmıştır.

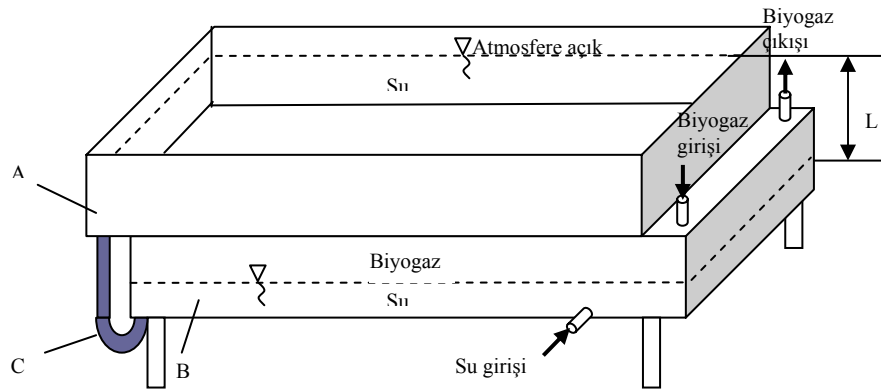
Deneme süresince, reaktör ortamının ve besleme materyalinin pH'sı, TK ve UK oranları, günde bir defa olmak üzere, sürekli olarak

ölçülmüş ve kaydedilmiştir. TK madde oranları, 103 °C’de etüvde sabit ağırlığa ulaşılana kadar bekletilerek, UK madde oranları da 600 °C’de kül fırınında yarım saat yakılarak kütsel olarak hesaplanmıştır. Tartımlarda 0,1 mg hassasiyette Precisa XB220 marka terazi kullanılmıştır. pH ölçümleri, Hanna’nın pH 213 model masaüstü pH metresi ile protein ve kirli ortamlara uygun elektrot kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen biyogazın kompozisyonu, hem reaktör çıkışında hem de gazometrede, Gas Data firmasının LMXi model multi gaz analizörüyle ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ölçümlerde üretilen biyogazın içerisinde bulunan CH₄, CO₂, O₂, N₂ ve H₂S hacimsel yüzde olarak tespit edilmiştir. Günlük olarak üretilen biyogazın miktarı, kalibre edilmiş kuru tip doğal gaz sayacıyla ölçülmüştür. Ayrıca sistemin reaktör sıcaklığı, ortam sıcaklığı, güneş kolektörlerinin giriş, çıkış ve yüzey sıcaklıkları, sıcak su akümülayon tankının sıcaklığı, enstitüde geliştirilen bir dataloger kullanılarak, yarım saatte bir ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Ayrıca sistemde bulunan elektrikli yardımcı ısıtıcının, karıştırma ve sirkülasyon pompalarının enerji tüketimleri, dijital elektrik sayacı yardımıyla günlük olarak tespit edilmiştir.

5 m³ kapasiteli pilot ölçekli biyogaz sistemindeki deneme 20 gün sürdürülmüştür. Reaktör, % 10 TK oranına sahip 5 ton sığır atığı+sü karışımı ile doldurulmuştur. Denemenin ilk 5 gününde, reaktör ve gazometre üzerinde bulunan çıkışlardaki kaçaklar giderilmeye çalışılmış, bu nedenle sağlıklı ölçüm alınamamıştır. Kaçakların giderildiği 6. günden itibaren, reaktör ve ortam sıcaklığı, günlük olarak üretilen biyogaz miktarı ve kompozisyonu, sistemin ısıtılmasına harcanan biyogaz miktarı ve elektrik enerjisi tüketimi sürekli olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Deneme süresince, son kullanıcıların karşılaşılabileceği sorunlar irdelenmiş, çözüm yolları aranmıştır.

3.3 Biyogaz Depolama Tankında Gaz Arıtımıyla İlgili Denemeler

Sistem dizayn edilirken, suyun gazla yer değiştirdiği bir depolama ünitesi üzerinde çalışmalar başlatılmış, Şekil 3.7’de şematik gösterimi verilen 5 m³ kapasiteli biyogaz depolama tankı üretilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Biyogaz depolama tankının şematik gösterimi

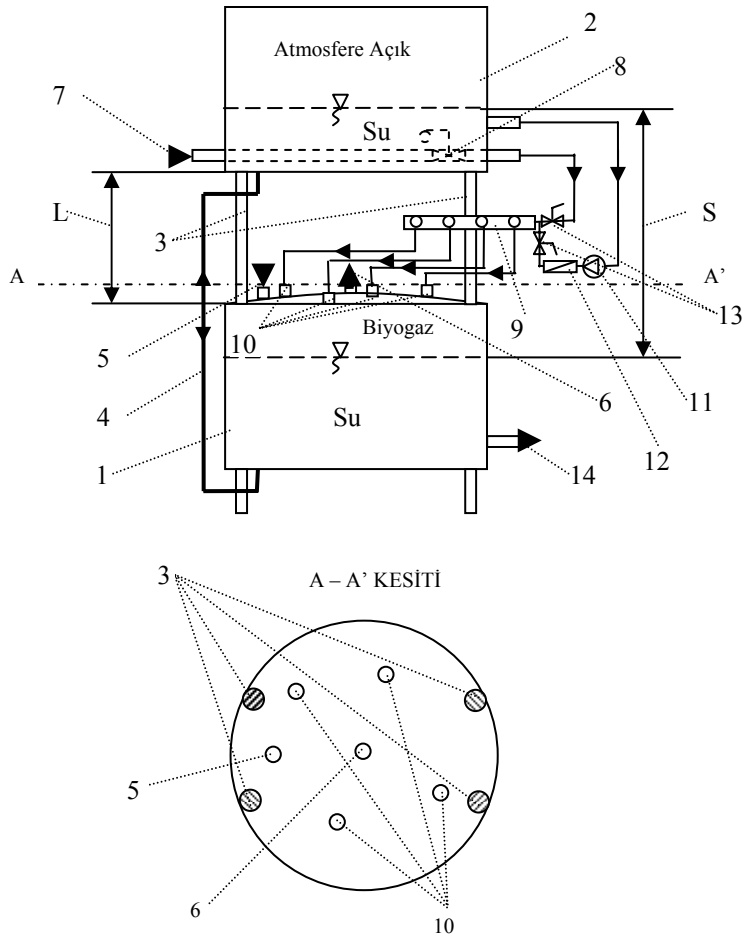
Şekil 3.7’den görüleceği gibi, biyogaz depolama tankı biri atmosfere açık (A) diğeri kapalı (B) üst üste yerleştirilmiş iki tanktan oluşmaktadır. Reaktörden gelen biyogaz gaz girişinden B tankına verilmekte, bu tank içerisinde bulunan su ise bağlantı borusu (C) ile A tankına aktarılmaktadır. Her iki tankta bulunan su seviyeleri arasındaki L mesafesi, oluşturduğu statik basınç ile biyogazı basınçlandırmaktadır. B tankının gaz çıkışından biyogaz kullanım amacıyla alındığında ise, A tankında bulunan su C borusuyla B tankına geçmektedir. Çalışma prensibi anlatılan biyogaz depolama tankının resmi Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8 5 m³ kapasiteli biyogaz depolama tankının görünümü

Gaz depolama tankının kullanımı sırasında, basınçla ilgili sorunla karşılaşmıştır. Gazın yeterli miktarda olduğu durumda sorun yaşanmazken, gaz miktarının azalması durumunda, basıncı sağlayan L yüksekliğinin, cihazların gereksinim duyduğu basıncın altına düştüğü gözlenmiştir. Bu sorunu gidermek için tanka su eklenerek L yüksekliği artırılmış, fakat gaz kullanımının azaldığı, dolayısıyla tank içinde depolanan biyogazın çoğaldığı zaman gerekenden fazla verilen suyun drenaj edilmesi gerekmiştir. Sürekli kullanımda bu durum, sadece buharlaşmayla kaybedilen suyun yerine konması yanında ek su ihtiyacına neden olacak, işletme maliyetlerinin yükselmesini sağlayacaktır. Karşılaşılan bu sorun, A ve B tanklarının birbirinden ayrılarak minimum basıncın istenilen seviyede tutulmasıyla çözülmüştür. Ayrıca biyogaz kompozisyonu ile ilgili yapılan ölçümlerde, reaktör içerisinde bulunan biyogaz ile gaz depolama tankında bulunan biyogaz arasında farklılıkla karşılaşmıştır. CO₂ ve H₂S'in aynı sıcaklık ve basınçta CH₄'e göre suda çözünürlüğünün çok daha yüksek olmasından kaynaklanan bu durumun, kullanıma verilen biyogazın CH₄ oranının artırılmasında, dolayısıyla istenmeyen gazların arıtılmasında kullanılabileceği anlaşılmıştır. Böylece yeniden dizayn edilen gaz depolama tankında, gaz arıtım fonksiyonu da

göz önüne alınmıştır. İki depo arasındaki basınç farkı kullanılarak, üst depoda çözünen CO_2 'in bir miktarını atmosfere bırakan suyun, bir santrifüj pompa yardımıyla, alt depo üzerindeki nozullardan biyogazın üzerine dağıtılarak verilmesi planlanmıştır. Bu doğrultuda oluşturulan yeni biyogaz depolama tankının sistem şeması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Biyogaz depolama tankının sistem şeması

Şekil 3.9'da parçalar numaralandırılmış olup karşılıkları şu şekildedir.

- 1) Gaz depolama tankı,
- 2) Su toplama tankı,
- 3) Taşıyıcı ayaklar ,
- 4) Gaz depo tankı ve su toplama tankı arasındaki bağlantı borusu,
- 5) Biyogaz girişi,
- 6) Biyogaz kullanım çıkışı,
- 7) Şebeke suyu girişi,
- 8) Şamandıralı vana,
- 9) Kolektör,
- 10) Nozullar,
- 11) Santrifüj pompa,
- 12) Çekvalf,
- 13) Küresel vanalar,
- 14) Kullanma suyu çıkışı.

Gazometre biri biyogazın depolandığı atmosfere kapalı, diğeri gaz depolama tankında gazla yer değiştiren suyun depolandığı atmosfere açık iki adet silindirik tanktan oluşmaktadır. İki tank, aralarında belirli bir yükseklik seviyesi (L) olacak şekilde taşıyıcı ayaklarla birbirine bağlanmıştır. Ayrıca biyogazın depolanması sırasında gaz depolama tankını terkeden suyun su depolama tankına iletilmesini sağlayan bağlantı borusu bulunmaktadır. Bu bağlantı borusu her iki depoya en alttan bağlanarak, tüm hacmin etkin olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır. Reaktörden gelen biyogaz, gaz bağlantı girişinden gaz depolama tankına girmekte ve kullanım çıkışından gaz depolama tankını terketmektedir. Biyogazın kullanım basıncı, gaz depolama tankındaki su seviyesi ve su toplama tankındaki su seviyesi arasındaki fark (S) nedeniyle oluşan hidrolik basınca bağlı olarak değişmektedir. Böylece biyogazın depolanması sırasında gaz ve suyun yer değiştirmesi prensibinden yararlanılmakta, bakım gerektiren hareketli parçaların kullanılmasına gerek kalmamaktadır. İki tank arasındaki yükseklik

seviyesi (L) biyogaz kullanımında istenilen basınca göre imal edilerek gazometre çalışma basıncının ayarlanması mümkün olmakta, ek bir basınçlandırıcı cihaz gereksinimi ortadan kalkmaktadır.

Gazometre içerisindeki su seviyesi herhangi bir nedenle azaldığında, şebeke suyu girişinden gelen su şamandıralı vana ile kontrol edilerek sisteme beslenmektedir. Beslenecek su bir kolektörden gaz depolama tankının üzerinde bulunan nozullara dağıtılmakta, böylece biyogaz üzerine püskürtülerek CO₂ giderimi artırılmaktadır. Şebekeden su beslemesi gerekmediği zamanlarda, görece düşük basınçtan dolayı suda çözünmüş CO₂ miktarının daha az olması nedeniyle, su depolama tankındaki su, bir santrifüj pompa yardımıyla çekvalfden geçirilerek kolektöre verilmekte ve nozullar aracılığıyla gaz üzerine püskürtülebilmekte ve CO₂ giderimi artırılabilir. Her iki su besleme sistemi arasında tercih yapmak amacıyla, küresel vanalar kullanılmaktadır. Biyogazın içerdiği partiküllerin ve çözünen gazların kirlilik oluşturmaları nedeniyle gazometre içerisindeki suyun değiştirilmesi gerektiğinde, kullanma suyu çıkışından alınan su çeşitli amaçlarla kullanılabilir.

Bu prensiple çalışan 0,5 m³ hacime sahip gaz depolama tankı dizayn edilerek oluşturulmuştur. Biyogaz arıtımıyla ilgili denemeler, Şekil 3.10'de genel görünümü ve alt depoda bulunan su dağıtım sistemi görülen bu gaz depolama tankında yürütülmüştür. Çalışma süresince, üst depodan alınan su, bir zamanlayıcı kullanılarak, farklı sürelerde, bir santrifüj pompa vasıtasıyla biyogazın üzerine püskürtülmüş, biyogaz kompozisyonundaki değişimler ölçülerek kaydedilmiştir. Eş zamanlı olarak, reaktör içerisindeki biyogaz kompozisyonu da ölçülerek kaydedilmiştir. Böylece santrifüj pompanın en uygun çalışma zamanı ve gaz depolama tankının gaz arıtım performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Denemeler sonucunda, biyogaz depolama tankıyla ilgili faydalı model başvurusu yapılmış ve “Biyogaz Tesisleri İçin Gaz Arıtma İşlevli

Gazometre” isimli “TR 2006 02900 Y” nolu faydalı model belgesi alınmıştır.



Şekil 3.10 0,5 m³ hacimli biyogaz depolama tankı ve su dağıtım sistemi

3.4 Reaktör Sıcaklığındaki Dalgalanmaların Önlenmesiyle İlgili Denemeler

Güneş enerjisi destekli biyogaz reaktörlerinde karşılaşılan önemli sorunlardan birisi de, reaktör ısı değiştiricisine gönderilen yüksek sıcaklıktaki akışkanın sebep olduğu ani sıcaklık değişimleridir. Bu değişimler metan üreten bakteriler üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Ayrıca ısı değiştiricilerin yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle kabuklaşma meydana gelir. Bu durum ısı değiştiricisinin verimini düşürerek, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Kabuklaşmanın önlenmesi için mezofilik bölgede çalışan ısı değiştiricisine gönderilen suyun sıcaklığının 45–55 °C arasında tutulması gerekmektedir. Özellikle ısı kayıplarının az ve güneş ışınım şiddetinin yüksek olduğu yaz aylarında, akümülayon tankında bulunan suyun sıcaklığı yükselmekte ve biyogaz sisteminde bahsedilen sorunlar yaşanabilmektedir. Güneş enerjisi desteğinin projelendirilmesinde kış koşulları dikkate alındığında, akümülayon tankındaki sıcaklık yükselmesi daha da artmakta, sadece

basit bir termostatin sıcaklık kontrolünde kullanılması durumunda, sıcaklık dalgalanmaları kaçınılmaz hale gelmektedir (Koçar vd., 2007b). Bu sakıncanın giderilmesi için sisteme otomatik kontrol elemanlarının eklenmesi ve sistem tasarımında değişikliğe gidilmesi gereklidir (Koçar vd., 2003). Fakat gerek ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, gerekse karmaşık otomasyon sistemlerinin kırsal kesimde kullanılabilirliğinin ve bakımının zorluklar içermesi, daha basit çözüm yollarının aranmasını gerekli kılmaktadır.

Buradan hareketle, pilot ölçekli güneş enerjisi destekli biyogaz sisteminde, sıcaklık dalgalanmasıyla ilgili denemeler gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi desteğine ait sıcak su akümülayon tankının sıcaklığı, elektrikli yardımcı ısıtıcı kullanılarak 90 °C'ye çıkarılmış, sıcaklık kontrolünün tek termostatla yapıldığı sistemde meydana gelen sıcaklık değişimleri 3 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Daha sonra sisteme ikinci bir termostat seri olarak bağlanmış, ısıtma ceketinde bulunan suyun sıcaklığının da kontrolü sağlanmıştır. Denemeler, reaktör sıcaklığındaki dalgalanmanın minimuma indirilebilmesi için, ikinci termostatin sıcaklık ayarının tespit edilmesine yönelik olarak sürdürülmüştür.

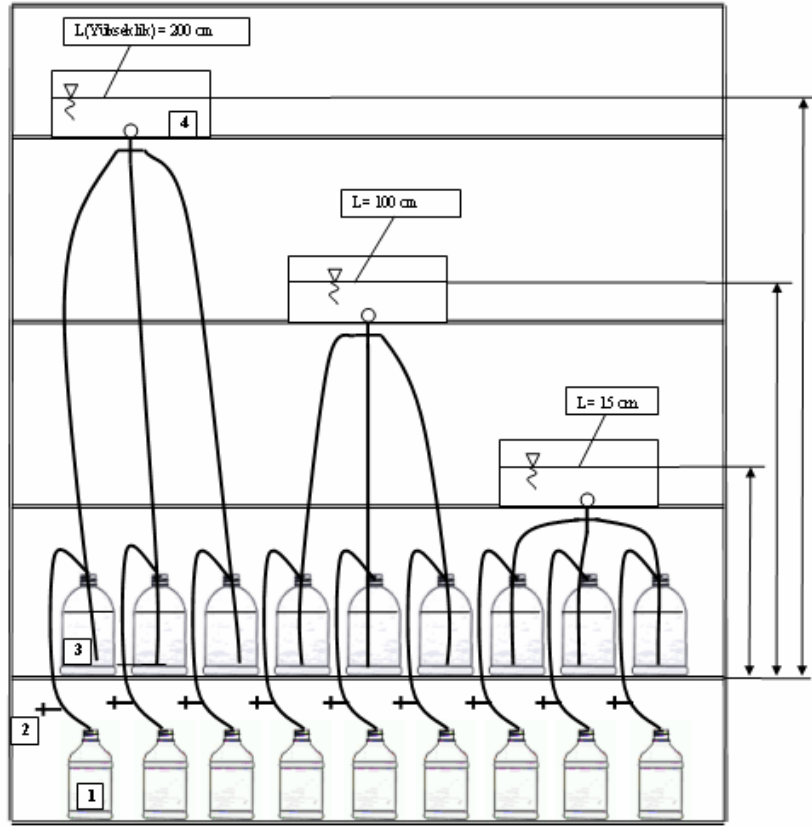
3.5 Basınç Etkisi ile İlgili Denemeler

Reaktörün çalışma basıncının, anaerobik bakterilere ve dolayısıyla biyogaz üretim verimine etkisi söz konusudur. Özellikle reaktör içerisindeki basınç değişimlerinden, toksik etki yaratacağı için kaçınılması gerekmektedir. Literatürde, basıncın biyogaz üretimine etkisiyle ilgili çelişkili bilgiler bulunmaktadır. Denemelerin yapıldığı pilot ölçekli biyogaz sisteminde kullanılan gaz depolama tankının özelliği nedeniyle, reaktör içerisinde oluşan basınç, 150 – 200 mbar gibi yüksek seviyelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, farklı çalışma

basınçlarının biyogaz üretimine etkileri, laboratuvar ölçekli bir deney düzeneğinde incelenmiştir (Eryaşar ve Koçar, 2006).

Deneyde dokuz adet 1 lt hacimli cam şişeden oluşan reaktörler kullanılmıştır. Üç ayrı basınç düzeyi için üç paralel reaktörde denemeler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, sıcaklık kontrollü, yalıtımlı odada kurulmuş ve mezofilik sıcaklık bölgesinde (35 °C) çalışmalar yürütülmüştür. Deneyde besleme materyali olarak, Yaşar Holding'e bağlı Çamlı Yem Besicilik Sanayi ve Tic. A.Ş.' den temin edilen taze sığır atığı sulandırılarak kullanılmıştır. Kullanılan atığın toplam katı madde oranı (TK) % 21, toplam kuru maddede uçucu katı madde oranı (UK) % 78 dir. Besleme için TK % 10 olacak şekilde sulandırma yapılmıştır. Üretilen biyogazın depolanmasında ve üretim miktarının ölçülmesinde yine dokuz adet 2,5 lt hacimli ölçeklendirilmiş cam şişelerden yararlanılmıştır. Basınçlandırma, her grup için ayrı seviyelere yerleştirilmiş su toplama üniteleriyle sağlanmıştır. Su toplama üniteleri, gazometrelerin bulunduğu bölmeden yükseklikleri sırasıyla 200, 100 ve 15 cm olacak şekilde yerleştirilen üç ayrı plastik depodan oluşturulmuştur. Gaz ve su bağlantıları 6 mm çapında şeffaf plastik hortumlarla sağlanmıştır. Reaktörler ve gazometreler arasına, gaz örnekleme için portlar yerleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.11'de görülmektedir.

Reaktörler kesikli beslemeli tip olarak çalıştırılmış ve herbiri 800 ml hacimde doldurulmuştur. Deneme 60 gün boyunca 35 °C'de, mezofilik sıcaklık bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyogaz miktarı, ölçekli gazometrelerde oluşan su seviyesi ölçülerek, günlük olarak kaydedilmiştir. Karıştırma günde bir defa manuel olarak yapılmıştır.



Şekil 3.11 Deney düzeneği (1) Reaktör (2) Gaz örnekleme portu (3) Gazometre (4) Su toplama kabı

Reaktörlerden alınan biyogazın içeriği gaz kromatografi metodu ile belirlenmiştir. Analiz için, Agilent 6890N gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Gaz analizleri, gazometrelerin her boşaltılışında tekrarlanmıştır. Günlük ve toplam biyogaz ve metan üretimi, standart sıcaklık ve basınç şartlarına (0 °C ve 1 atm) göre düzeltilerek hesaplanmıştır. Deney sonunda elde edilen fermente atıkların TK madde oranları, 103 °C’de etüvde sabit ağırlığa ulaşılana kadar bekletilerek, UK madde oranları da 600 °C’de kül fırınında yarım saat yakılarak kütle

olarak hesaplanmıştır. Tartımlarda 0,1 mg hassasiyette Precisa XB220 marka terazi kullanılmıştır.

3.6 Biyogazın Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Elde edilen biyogaz, çeşitli cihazlarda, pişirme, ısıtma, aydınlatma ve elektrik üretimi amacıyla kullanılmıştır. Pişirmede kullanım amacıyla, LPG ile çalışan bir ocak alınmış, primer hava girişi kısılarak biyogazla çalışır hale getirilmiştir. Yine LPG ile çalışan 20000 kcal/h gücünde bir kombi, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilmiş, ısıtma giriş çıkışına bir fancoil eklenerek, laboratuvarın ısıtılması amacıyla kullanılmıştır. Aynı kombiden, oluşturulan 5 m³'lük pilot biyogaz tesisinin ısı yükünü karşılamak amacıyla yararlanılmıştır. 2,2 kW gücünde benzinli bir jeneratör alınmış, LPG dönüşümü yapıldıktan sonra, biyogazla çalışır hale getirilmiştir. Şekil 3.12'de biyogazla çalıştırılan bu cihazlar görülmektedir.



Şekil 3.12 Biyogazın pişirmede, sıcak su üretiminde, mekan ısıtmasında ve elektrik üretiminde kullanımına yönelik çalışmalar

Jeneratörde, kWh elektrik enerjisi elde etmek için gerekli biyogaz miktarını belirten özgül yakıt ihtiyacının (SFC_B) belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Özgül yakıt ihtiyacı;

$$SFC_B = \frac{V_B}{P_e \cdot t} \text{ (m}^3\text{/kWh)} \quad (3.1)$$

formülüyle bulunur. Burada V_B harcanan hacimsel biyogaz miktarı (m^3), P_e jeneratörün gücü (kW), t ise jeneratörün çalıştırılma süresini (h) göstermektedir. Deney süresince harcanan biyogaz miktarı gaz sayacı yardımıyla ölçülmüş, ölçülen değer standart sıcaklık ve basınca göre (0°C ve 1 atm) düzeltilmiştir. Ayrıca kullanılan biyogazın kompozisyonu gaz analizörü kullanılarak tespit edilmiş, buradan yola çıkılarak ısı değeri $H_{a,n}$ (kWh/m^3), 2.7, 2.8 ve 2.9 nolu formüller kullanılarak belirlenmiştir. Buradan elektrik çevrim verimi η_e ,

$$\eta_e = \frac{1}{SFC_B \cdot H_{a,n}} \quad (3.2)$$

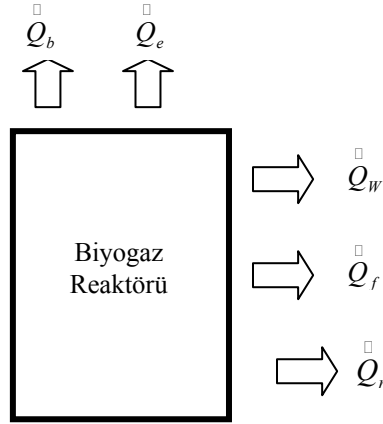
formülüyle hesaplanmıştır.

Biyogazla çalışan ocağın veriminin bulunması amacıyla da bir deney gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneyde, bir kap içine tartılarak konan su, 60 ve 80°C olmak üzere iki ayrı sıcaklığa ısıtılmış, suyun ilk ve son sıcaklıkları, buharlaşan su miktarı, harcanan biyogaz miktarı ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde $0,01^\circ\text{C}$ çözünürlükte, $pt 100$ proba sahip olan, Ahlborn-Almemo 2390-1 ölçüm cihazı, ağırlık ölçümünde ise $0,01 \text{ g}$ hassasiyette Precisa XB6200C marka terazi kullanılmıştır. Ocak verimi η_o ,

$$\eta_o = \frac{m_s \cdot (T_2 - T_1) \cdot C_s + m_b \cdot L_B}{H_{a,n} \cdot V_B} \quad (3.3)$$

formülü ile bulunmuştur (Werner et al., 1989). Burada m_s ısıtılan suyun miktarı (kg), T_1 ve T_2 sırasıyla suyun ilk ve son sıcaklığı (K), C_s suyun özgül ısı kapasitesi (4,2 kJ/kg.K), m_b buharlaşan su miktarı (kg), L_B buharlaşmayla kaybedilen ısı enerjisi (2260 kJ/kg), $H_{a,n}$ biyogazın hacimsel ısı değeri (kJ/m³), V_B kullanılan biyogaz miktarıdır (m³). Verim deneyleri ve hesaplamaları, ocakta bulunan üç farklı büyüklükteki yakıcı için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

3.7 Biyogaz Reaktörünün Isıl Analizi



Şekil 3.13 Biyogaz reaktörünün ısı kayıpları

Biyogaz reaktörünün ısı kayıpları Şekil 3.13’de görülmektedir. Burada; reaktör yüzeylerinden oluşan ısı kaybı $\dot{Q}_w$ (W), besleme materyalinin reaktör sıcaklığına getirilmesi için gerekli ısı akımı $\dot{Q}_f$ (W),

reaktörü terkeden biyogazla oluşan ısı kaybı $\dot{Q}_b$ (W), buharlaşma yoluyla oluşan ısı kaybı $\dot{Q}_e$ (W) ve reaksiyon sırasında gerekli ısı akımı $\dot{Q}_r$ (W) ile gösterilmiştir.

Bu kayıplar göz önüne alındığında, sistemin ısı dengesini korumak için gerekli toplam ısı ihtiyacı $\dot{Q}_t$ (W) şu şekildedir (Kishore, 1989):

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_w + \dot{Q}_f + \dot{Q}_b + \dot{Q}_e + \dot{Q}_r \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\dot{Q}_b$, $\dot{Q}_e$ ve $\dot{Q}_r$ değerlerinin yanında ihmal edilebilecek büyüklüktedir. Bu yüzden reaktörün toplam ısı ihtiyacı;

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_w + \dot{Q}_f \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. Reaktör yüzeylerinden oluşan ısı kaybı $\dot{Q}_w$ şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Q}_w = A \cdot K_T \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

Bu formülde toplam reaktör yüzey alanı A (m^2), toplam ısı geçiş katsayısı K_T ($W/m^2\text{°C}$) reaktör çalışma sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki fark ΔT (°C) olarak verilmiştir. K_T hesaplanırken reaktör yüzeylerinde bulunan malzeme katmanlarının kalınlıkları l_n (m) ve ısı

iletim katsayıları λ_n (W/ m°C) göz önüne alınır. Reaktörün bulunduğu ortamın ısı taşınım katsayısı $\alpha_{dış}$ (W/ m²°C) ve reaktör içindeki besleme materyalinin ısı taşınım katsayısı $\alpha_{iç}$ (W/m²°C) yardımıyla toplam ısı geçiş katsayısı;

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + ... + \frac{l_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \quad (3.7)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Besleme materyalinin fermentasyon sıcaklığına getirilmesi için gerekli ısı miktarı $\dot{Q}_f$ (W), m besleme materyalinin kütleli debisi (kg/s), C_p özgül ısısı (J/kg°C) ve ΔT reaktör sıcaklığıyla besleme materyalinin sıcaklığı arasındaki fark (°C) olmak üzere;

$$\dot{Q}_f = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Güneş enerjisi desteği göz önüne alınıp, tüm kayıplar hesaplandıktan sonra sistemin ısı dengesi şu ifadeyle gösterilir,

$$\dot{Q}_t + \dot{Q}_A = \dot{Q}_G + \dot{Q}_Y \quad (3.9)$$

Burada, $\dot{Q}_A$ sıcak su akümülayon tankının ısı kaybı (W), $\dot{Q}_G$ güneşten kazanılan net ısı akımı (W) ve $\dot{Q}_Y$ yardımcı ısıtıcının sağladığı ısı akımıdır (W). Biyogaz sisteminin ısıl denge modeli oluşturulurken bu eşitlikler göz önüne alınmıştır.

Oluşturulan ısıl denge modeli baz alınarak, I. İklim bölgesinde bulunan İzmir ili için, 5 m³ hacimli, mezofilik koşullarda çalışan bir biyogaz reaktörünün optimum izolasyon kalınlığı, ömür boyu maliyet analizi yapılarak elde edilmiştir (Eryaşar ve Koçar, 2004). Analizlerde Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünden alınan 2002–2003 yılları günlük iklim verileri kullanılmıştır. Besleme materyalinin çalışma sıcaklığına ısıtılması için gerekli ısı miktarının hesabında, İzmir Büyükşehir Belediyesinden alınan aylık ortalama şebeke suyu sıcaklıkları göz önüne alınmıştır. Yapılan analizlerde, farklı izolasyon kalınlıkları için 10 yıllık işletme ömrü çerçevesinde oluşan bütün harcamalar ve getiriler, tespit edilen iskonto oranı baz alınarak bugünkü değerlerine çevrilmiştir. Tasarruf edilen yıllık enerji maliyetinin hesaplanmasında, doğalgazın ülkemizin kırsal kesimlerinde kullanılmadığı göz önüne alınarak, LPG referans yakıt olarak kullanılmıştır. Buradan yıllık enerji tasarrufu N_p (€);

$$N_p = P_y E_Y \quad (3.10)$$

formülüyle bulunur (Hasan, 1999). Burada P_y yakıttan elde edilen enerjinin birim maliyetini (€/J), E_Y ise yıllık tasarruf edilen enerji miktarını (J) göstermektedir. Sistem ömrü boyunca her yıl elde edilen tasarruf miktarı, net bugünkü değer çevrim faktörü PWF ile bugünkü değerlerine indirgenmiştir. PWF aşağıdaki eşitlikle elde edilir (Çomaklı ve Yüksel, 2003):

$$PWF = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \quad (3.11)$$

Burada i iskonto oranını, n ise yıl olarak sistemin ekonomik ömrünü göstermektedir. Buradan sistemden ömür boyu elde edilecek toplam tasarruf miktarının bugünkü değeri NPV (€);

$$NPV = N_p \cdot PWF \quad (3.12)$$

formülüyle elde edilir.

Yatırım maliyetlerinin hesaplanmasında, yalıtım malzemesi olarak taş yünü seçilmiş ve yüzeyin alüminyum levha ile kaplandığı varsayılmıştır. Yalıtım malzemesinin birim hacim başına maliyeti C_{by} (€/m³) elde edilirken her birim kalınlık başına gerekli hacimsel izolasyon miktarı, alüminyum levha alanı ve işçilik maliyeti piyasa fiyatlarıyla göz önüne alınmıştır. Böylece toplam yatırım maliyeti I_y (€);

$$I_y = Y C_{by} \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Burada Y toplam kullanılan izolasyon malzemesinin hacimsel miktarını (m³) göstermektedir. Analizlerde her birim izolasyon kalınlığının sağladığı tasarruf artışı miktarıyla, sebep olduğu yatırım maliyeti artışı bir grafik üzerine yerleştirilmiş, her iki değer eşitlendiği izolasyon kalınlığı optimum izolasyon kalınlığı olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar, reaktör malzemesinin çelik ve fiberglass olmasına göre ayrı ayrı yapılmıştır.

Optimum yalıtım kalınlığı belirlendikten sonra, optimum düzlemsel güneş kolektörü sayısı ve sıcak su akümülayon tankı hacminin saptanması amacıyla, yine ömür boyu maliyet analizi yapılmıştır. Söz konusu analizde, sistemin ekonomik ömrü 10 yıl olarak alınmış, 1,83 m² yüzey alanına sahip düzlemsel bakır güneş kolektörleri

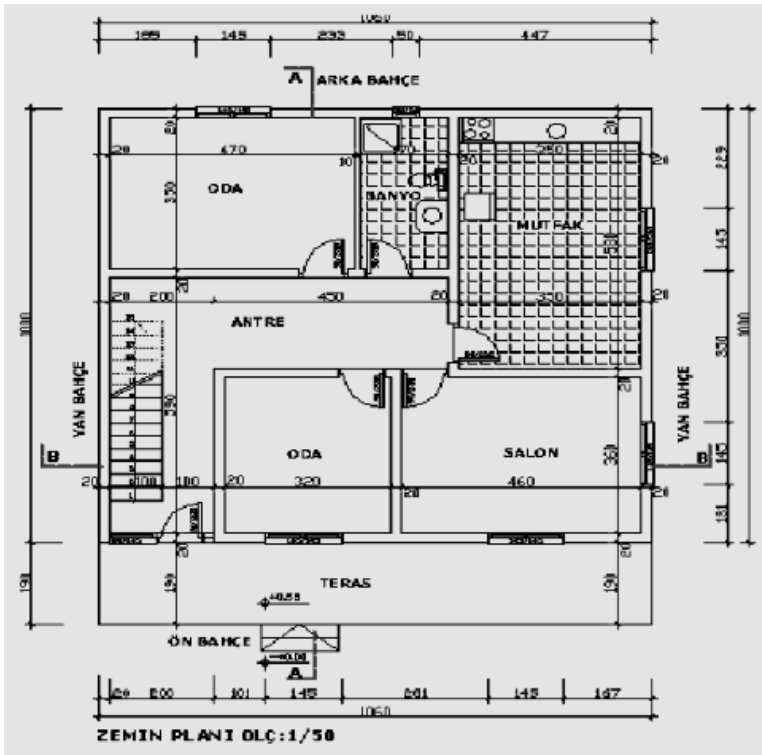
hesaplara dahil edilmiştir. Sıcak su akümülayon tankı, ısı değıştiricisi olarak bakır serpantin içeren dik tip olarak seçilmiştir. Güneş enerjisi sisteminin işletim ve bakım maliyetleri, 10 yıl sonraki hurda değeri ömür boyu maliyet analizinde göz önüne alınmıştır. Tüm bu değler ve yatırım maliyetleri belirlenirken piyasa fiyatları kullanılmış, referans yakıt olarak yine LPG baz alınmıştır. Hesaplamalarda $0,2\text{ m}^3$, $0,35\text{ m}^3$, $0,6\text{ m}^3$, $0,75\text{ m}^3$ ve 1 m^3 hacimlerinde sıcak su akümülayon tankları ile 1–10 adet arası düzlemsel güneş kolektörlerinin kombinasyonları dikkate alınmıştır. Bulunan değler bir tabloya yerleştirilmiş ve 10 yıllık işletme ömrüne göre karlılık miktarı en fazla olan kombinasyon bulunmuştur. Bulunan sistem büyüklüğü, oluşturulan biyogaz sistemi ısııl enerji modelinde yerine konularak, 2002-2003 yılları iklim koşullarında, reaktör ek ısıtma ihtiyacının güneş enerjisiyle karşılanma oranı belirlenmiştir.

3.8 Farklı İllere Göre Reaktör Boyutlarının Hesaplanması

Kurulan ısııl denge modeli kullanılarak, farklı iklim koşullarına sahip iller için, yine farklı büyüklüklerde biyogaz sistemlerinin, enerji ihtiyacını karşılama oranları araştırılmıştır. Bu doğrultuda ülkemiz iklim koşullarını temsil eden üç ayrı iklim bölgesinden ikişer il belirlenmiştir. İllerin belirlenmesinde özellikle büyükbaş hayvan potansiyelinin yüksekliği göz önüne alınmıştır. Belirlenen iller ve ait oldukları iklim bölgeleri aşağıda gösterilmiştir:

- I. İklim Bölgesi: İzmir, Antalya.
- II. İklim Bölgesi: Samsun, Diyarbakır.
- III. İklim Bölgesi: Ankara, Erzurum.

Hesaplamalarda Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünden alınan 2002–2003 yılları günlük iklim verileri kullanılmıştır. Besleme materyalinin çalışma sıcaklığına ısıtılması ve kullanım sıcak suyunun hazırlanabilmesi için gerekli ısı miktarının hesabında, yine her ilin belediyelerinden alınan aylık ortalama şebeke suyu sıcaklıkları göz önüne alınmıştır. Dört kişilik bir ailenin ısınma, pişirme, sıcak su hazırlama gereksinimleri hesaplara dahil edilmiştir. Pişirme amaçlı kullanımda günlük biyogaz tüketimi kişi başına 200 lt olarak alınmıştır. Sıcak su tüketiminin ise yine günlük kişi başına 45 °C sıcaklıkta 60 lt olduğu varsayılmıştır. Isınma ihtiyacının belirlenmesinde, Şekil 3.14’de planı verilen, yaklaşık 100 m² oturma alanına sahip bir ev, hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Hesaplamalarda kullanılan örnek evin planı

Excel’de oluşturulan modelde, evin ısı kayıpları hesaplanırken “TS 2164 Kalorifer Tesisatı Projelendirme Kuralları” göz önüne alınmış, her gün için ortalama hava sıcaklıkları hesaplarda kullanılmıştır. Her il için $0,3 \text{ m}^3$, $0,5 \text{ m}^3$, $0,75 \text{ m}^3$, 1 m^3 , 2 m^3 , 3 m^3 , 4 m^3 , 5 m^3 , 6 m^3 , 7 m^3 , 8 m^3 , 9 m^3 , 10 m^3 , 15 m^3 , 20 m^3 , 30 m^3 , 40 m^3 , 50 m^3 , 60 m^3 , 70 m^3 , 80 m^3 , 90 m^3 ve 100 m^3 hacmindeki reaktörlerin, mezofilik (37°C) ve termofilik (55°C) bölgede çalışması denenmiştir. Çıkan sonuçlara göre, göz önüne alınan evin, bahsedilen enerji ihtiyaçlarının % 100’ünün karşılanabildiği minimum reaktör boyutları, her il için tespit edilmiştir. Ayrıca enerji ihtiyacının düşük olduğu zamanlarda, artan biyogazın miktarı hesaplanmış, bu miktar biyogazın elektrik üretiminde kullanılmasıyla elde edilebilecek enerji miktarı bulunmuştur.

3.9 Biyogaz Sistemlerine Ekonomik Yaklaşım

Gerçekleştirilen çalışmalarda, kırsal kesim yaşayanlarının kullanabileceği, yatırım ve işletim maliyeti düşük, yüksek verimli ve kolay kullanımlı biyogaz sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, sistem veriminden ödün verilmeden, reaktör ve gazometrenin yapımında, farklı malzeme arayışına gidilmiştir. Bunun yanında otomasyon, ucuz, kolay bulunabilir parçalarla çözülmeye çalışılmıştır. Burada hedef, ülkemiz kırsal kesiminde sürdürülebilirliği mümkün olan biyogaz sistemlerinin oluşturulmasıdır. Bu bölümde, 5 m^3 kapasiteli bir biyogaz tesisinin, bölgemiz şartlarında uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu doğrultuda, Bölüm 2.19’da ayrıntıları verilen dinamik model kullanılarak, ömür boyu maliyet analizi, hem fiberglass hem de çelik reaktör ve gazometre içeren sistemler için ayrı ayrı yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda referans yakıt olarak LPG alınmıştır. Fermente gübrenin değerlendirilmesinde, organik gübrenin piyasa fiyatı baz alınmıştır. Yapılan çalışma, sadece bir fizibilite çalışmasıdır. Biyogaz

sistemlerinin makro seviyedeki getirileri ve maliyetleri göz önüne alınmamış, maddi karşılığı olmayan sosyal ve çevresel yararları analize dahil edilmemiştir. Daha çok son kullanıcıların öğrenmek istediği, yatırım ve işletim maliyetleri ve olası geri ödeme süreleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında, İzmir ili için, Türkvat bilgi sisteminden alınan güncel veriler kullanılarak, biyogaz sistemlerinin potansiyeli araştırılmış, olası getirileri tartışılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

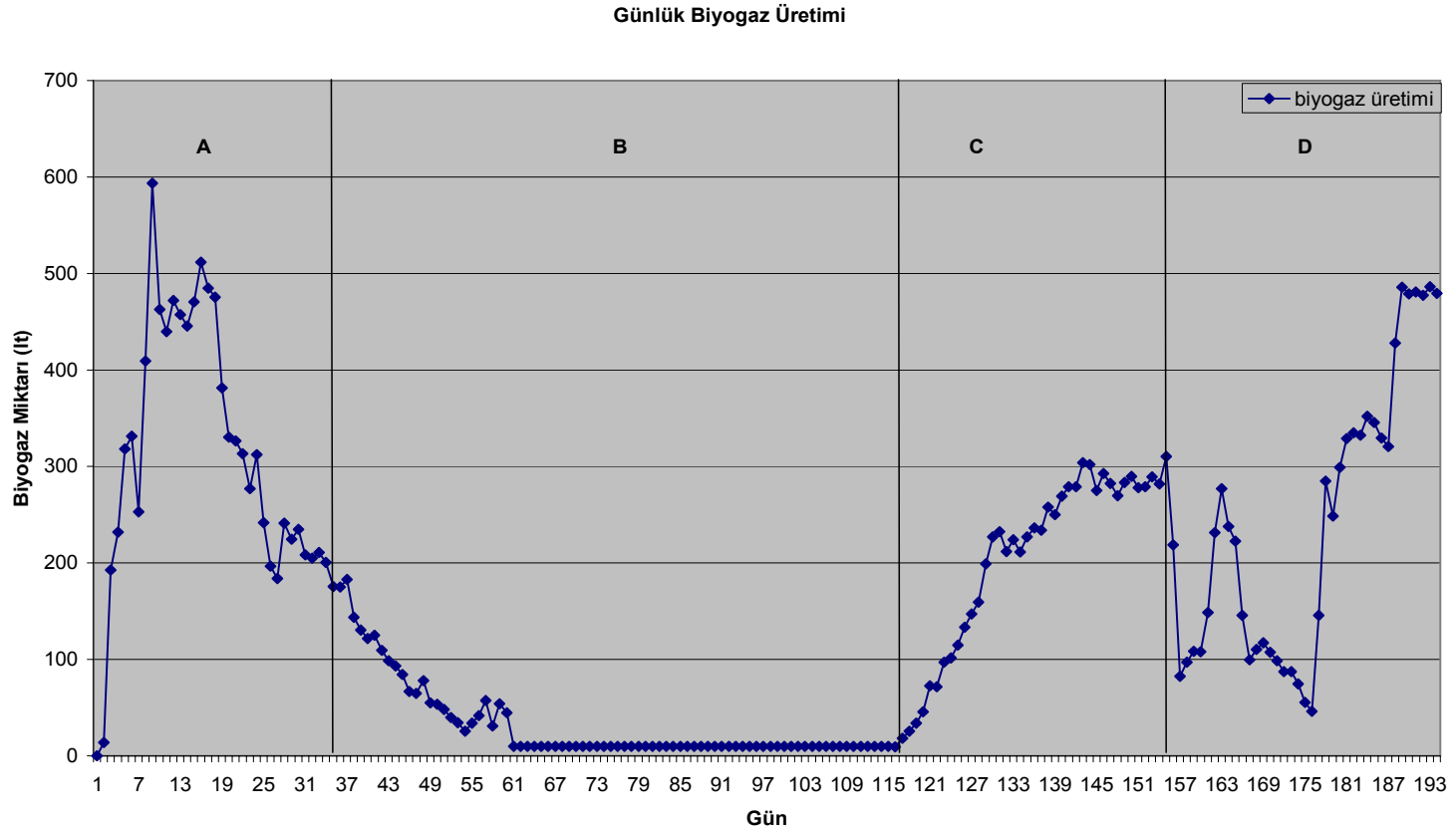
4.1 Pilot Ölçekli Biyogaz Üretim Denemeleri

Pilot ölçekli biyogaz sistemlerinde yapılan denemeler iki bölüm halinde incelenmiştir. Birinci bölümde, güneş enerjisi destekli 0,28 m³ kapasiteli biyogaz sisteminde yapılan sürekli beslemeli denemenin, ikinci bölümde ise 5 m³ kapasiteli biyogaz sistemiyle yapılan kesikli beslemeli denemenin bulguları tartışılmıştır.

4.1.1 Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Sisteminde Gerçekleştirilen Deneme

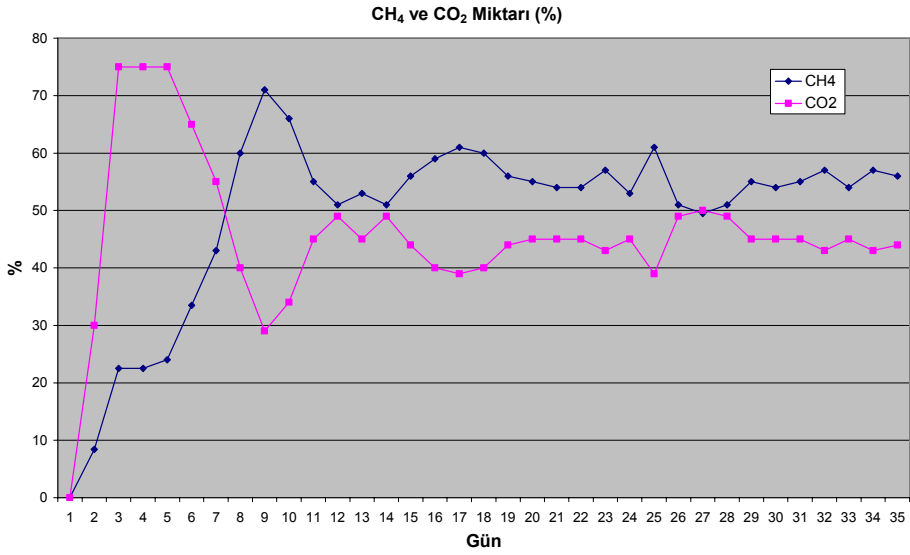
Bu sistemde gerçekleştirilen deneme, 13.09.2006 – 24.03.2007 tarihleri arasında, 194 gün sürdürülmüştür. Deneme süresince, günlük olarak elde edilen biyogaz miktarı, standart şartlara (0 °C – 1013 mbar) göre düzeltilmiş haliyle Şekil 4.1'deki grafikte görülmektedir. Şekil 4.1'den görüleceği gibi, deneme A (1–35. gün), B (36–115. gün), C (116–155. gün) ve D (156–194. gün) olmak üzere dört bölüme ayrılmaktadır.

A bölgesinde, % 12 TK oranında olacak şekilde sulandırılan taze sığır atığı ile sistem başlatılmış, deneyin 15. gününden itibaren sürekli besleme, günde bir defa olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Karıştırma pompasında meydana gelen arıza nedeniyle 17. günde kesilen beslemeye, daha sonraki 18 gün boyunca aralıklı olarak devam edilmiştir. Fakat karıştırma ve besleme pompasındaki arızanın devam etmesi ve atık temininde yaşanan aksaklıklardan dolayı, sistem kesikli rejime alınmıştır. Bu zaman diliminde yapılan deneme, kesikli deneme olarak alınabilir.



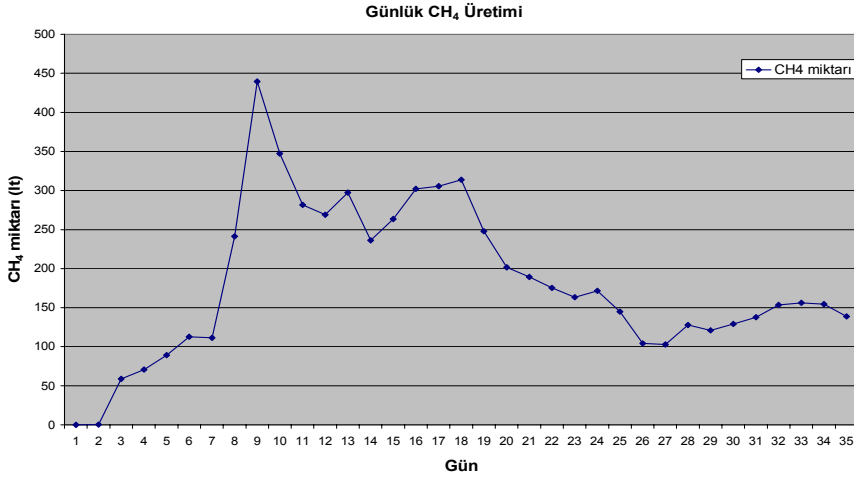
Şekil 4.1 Günlük biyogaz üretimi

Şekil 4.2' de denemenin ilk bölümünde üretilen biyogaz içerisindeki CH₄ ve CO₂ yüzdeleri hacimsel olarak verilmiştir. Grafikten görüleceği gibi, ilk 7 gün boyunca CO₂ daha yüksek seviyededeyken, bu noktadan sonra CH₄ yüzdesi daha yüksek gerçekleşmiştir. Bu zaman dilimi boyunca CH₄ oranı yaklaşık olarak % 55 civarında kaydedilmiştir.



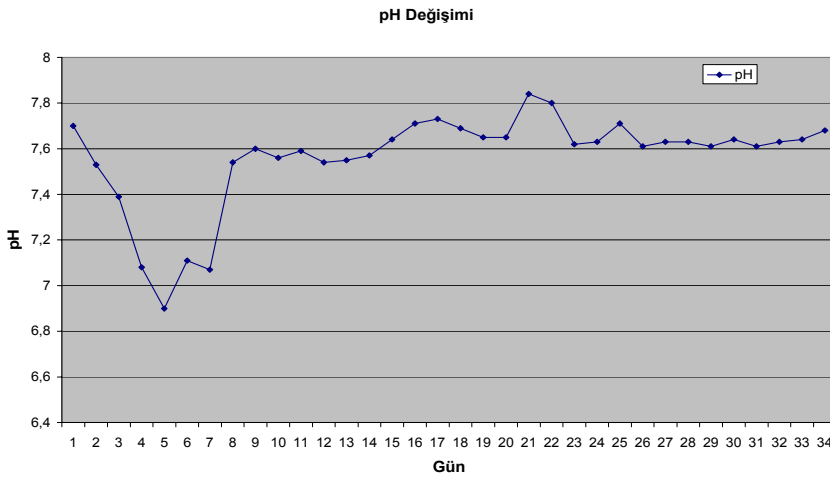
Şekil 4.2 A bölgesi için üretilen biyogazın CH₄ ve CO₂ oranları

Metan yüzdesi dikkate alınarak, günlük olarak üretilen metan miktarı Şekil 4.3'de görülmektedir. Metan üretim miktarı, denemenin 9. gününde pik değere ulaşmıştır. Daha sonra bir dalgalanma dışında metan üretiminde düşüş gözlenmektedir. Denemenin 20. gününden sonra bu düşüş, aralıklı beslemelerden kaynaklanan ufak çıkışlar dışında, sürekli olmuştur. Bu durum, mezofilik bölge (37 °C) için bekletme süresinin sığır atığında 20 gün olarak alınmasını destekler niteliktedir (Stafford vd., 1981; Kishore vd., 1987).



Şekil 4.3 A bölgesi için günlük üretilen metan miktarı

Bu bölgedeki fermentasyon sürecinde pH değişimine baktığımızda (Şekil 4.4), başlangıçta görülen ve asitleştirme aşamasından kaynaklanan düşüş dışında pH değerlerinin, literatürde de verildiği gibi, ortalama, 7,6 değerlerinde, hafif bazik seviyede gerçekleştiği görülmektedir (Jain vd.,1983; Badawi vd., 1992; Verma, 2002).

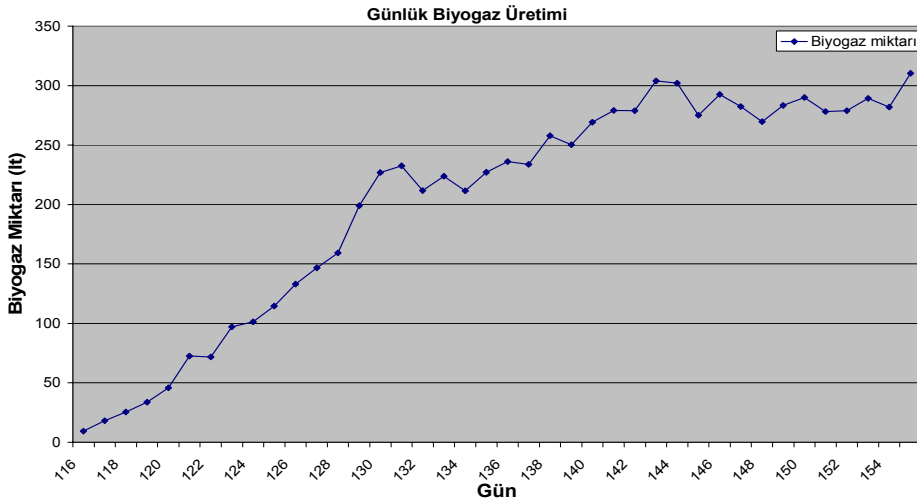


Şekil 4.4 pH değişimi

Fermentasyonun başlangıcında, % 12,32 olan TK oranı, A bölgesinin sonu olan 35. günde % 8,7'ye, toplam katı madde içinde % 71,75 olan UK oranının ise % 65,23'e gerilediği görülmüştür.

Denemenin 36 ila 115. günlerini kapsayan B bölgesinde ise prosese madde giriş ve çıkışı olmamıştır. Biyogaz üretiminin hemen hemen durduğu bu süreç, 81 gün sürmüştür. Bu zaman diliminde üretilen toplam biyogaz miktarı 1.981 lt iken, ilk 35 gün için bu değer 10.826 lt olarak gerçekleşmiştir.

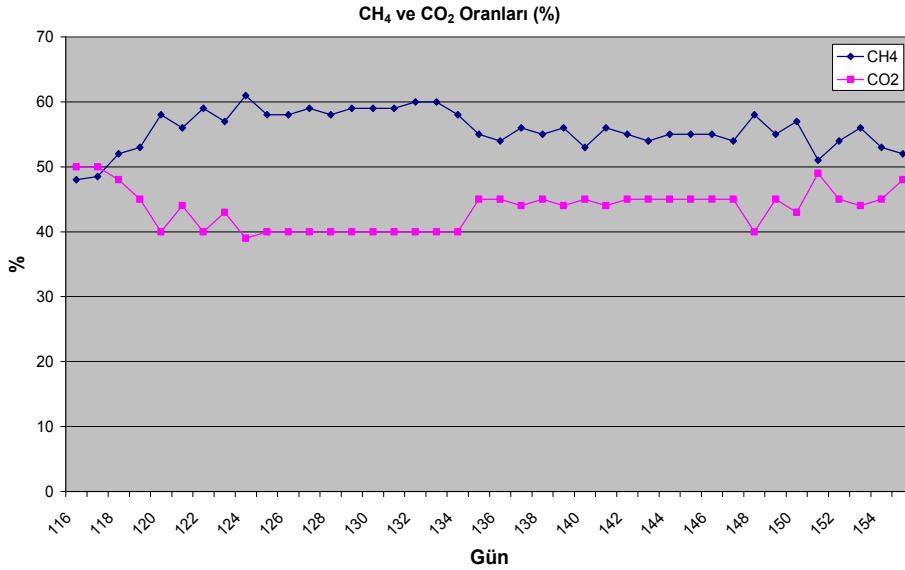
C bölgesinde, yani denemenin 116–154. günleri arasında, sistem mezofilik bölgede, sürekli besleme rejiminde çalıştırılmıştır. 130. güne kadar kademe kademe artırılan besleme miktarı, 130. günde, bekletme süresi 20 gün olacak şekilde ayarlanmış, bu rejim 154. güne kadar sürdürülmüştür. Bu zaman diliminde gerçekleşen günlük biyogaz üretimi Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5 Günlük biyogaz üretimi

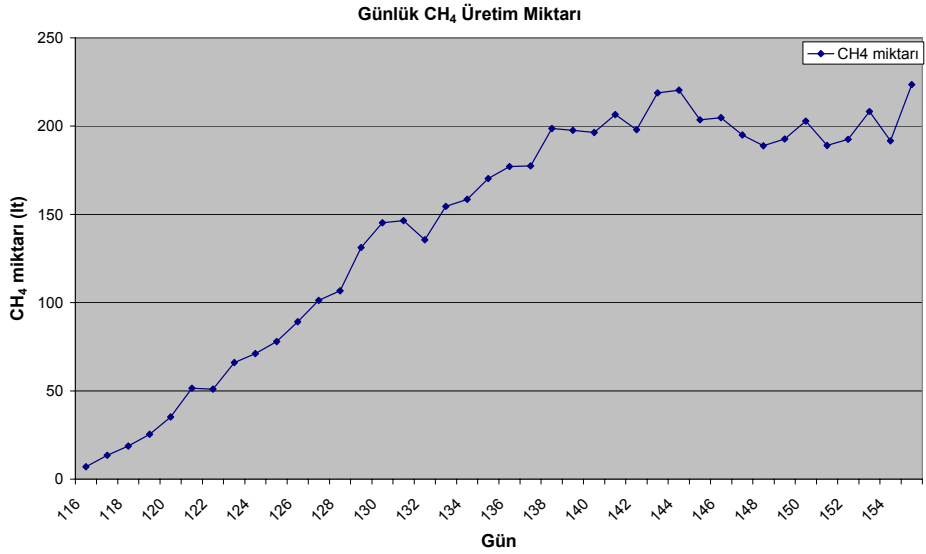
Şekil 4.5’den görüleceği gibi, biyogaz sistemi, besleme tekrar başlatıldığında, bekleme durumundan hemen biyogaz üretimine başlamıştır. Bu da bize, bir sorun nedeniyle sistem durdurulduğunda, tekrar üretimin başlamasının çok zaman almayacağını, bu nedenle işletimde esnekliğin söz konusu olduğunu göstermektedir. Başlangıçta beslemeyle orantılı şekilde kademe kademe yükselen üretim miktarı, tam yükte beslemenin başlatıldığı 130. günü takip eden 10 gün içerisinde, $1,2 \text{ m}^3\text{-biyogaz/m}^3\text{-reaktör.gün}$ verim seviyesine ulaşmıştır. Bu verim değeri, literatürde verilen sınır değerler arasındadır (Ghaly ve Singh, 1984; Demuyne vd., 1984). Bahsedilen zaman diliminin sonu olan 155. güne kadar aynı üretim miktarı devam etmiştir.

Bu deneme süresince, üretilen biyogazın içerisinde bulunan CH_4 ve CO_2 oranları Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6 Üretilen biyogaz içerisindeki CH_4 ve CO_2 oranları

Biyogaz içerisindeki metan oranına bakıldığında, sistemin tekrar başlatılması aşamasında % 60 civarı olan değerin, tam yükte besleme başlatıldığında ortalama % 55 civarında, normal seviyelerde devam ettiği görülmektedir. Bu da literatürde verilen sonuçlarla uyum içerisindedir (Anon., 1999b). Bu oranların göz önüne alınmasıyla, günlük CH_4 üretim miktarı Şekil 4.7’de verilmiştir.

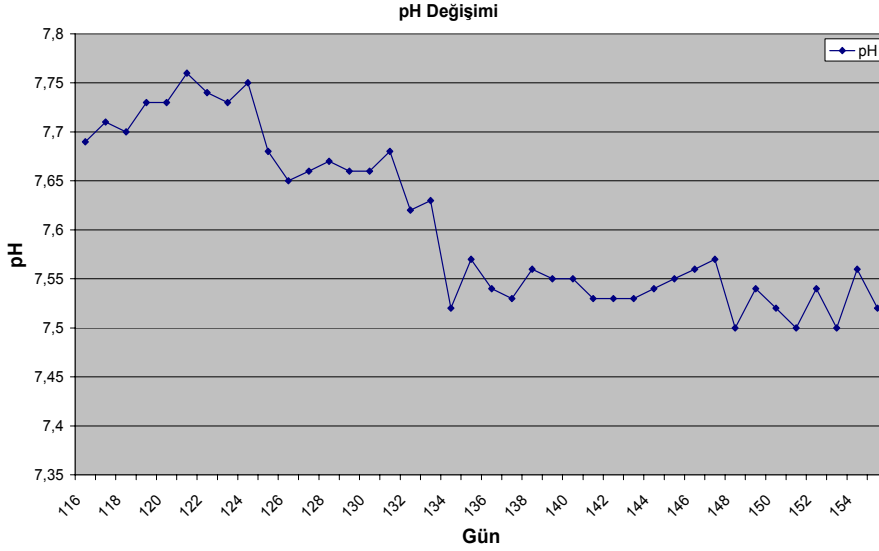


Şekil 4.7 Günlük CH_4 üretim miktarı

Şekil 4.7’deki günlük metan üretim miktarından da görüleceği gibi, tam yükte beslemenin başlatılmasından yaklaşık 10 gün sonra, önemsiz dalgalanmalar dışında, üretim dengeye gelmiştir.

Bu zaman diliminin başında, reaktör ortamının % 6,17 olan TK ve % 61,19 olan UK oranları, 155. günde, % 7,4 TK ve % 75 UK değerlerine yükselmiştir. TK ve UK oranlarında görülen bu yükselmenin nedeni, sistemin sürekli olarak ortalama % 12 TK, % 83 UK oranına sahip sulandırılmış sığır atığıyla beslenmesidir.

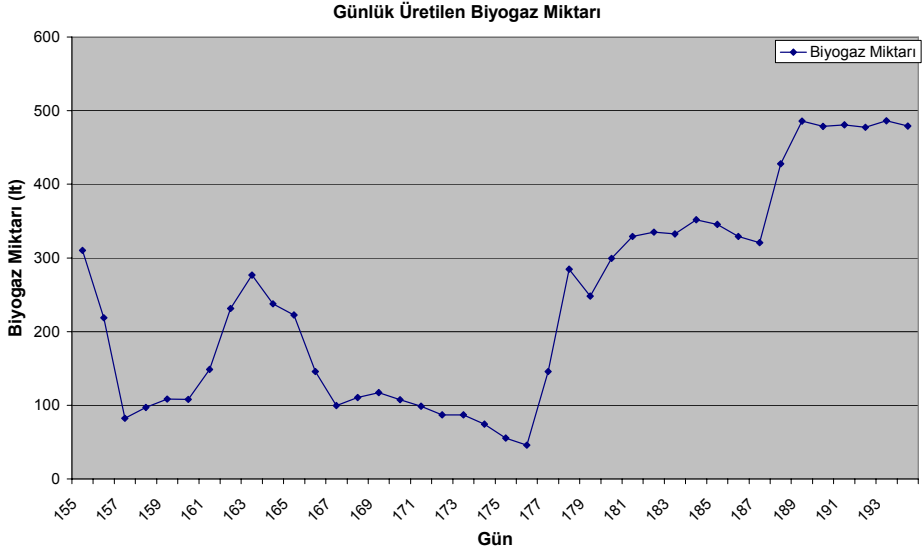
Şekil 4.8’de bu deneme sürecinde, ortam pH’sının değişimi görülmektedir.



Şekil 4.8 Deneme süresince ortam pH’sının değişimi

Şekil 4.8’den görüleceği gibi ortam pH’sı, kademeli besleme başlatıldığında, küçük bir yükselmenin ardından düşüşe geçmiştir, biyogaz üretimi için uygun olan 7,5 değerlerinde dengeye gelmiştir (Kishore vd., 1987). pH değişimi bize, CH_4/CO_2 oranıyla birlikte, sistemin işletilmesinde bir sorun olmadığını göstermektedir.

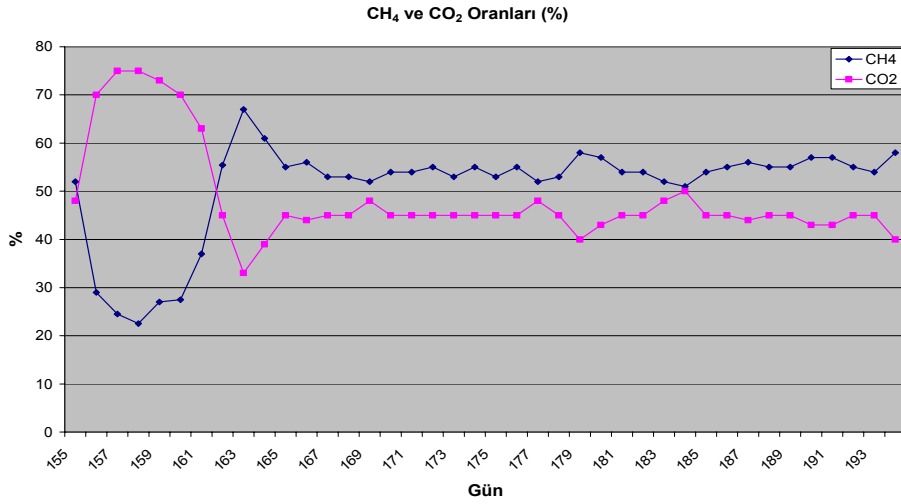
Çalışmanın son evresi olan D bölümünde (155-194. gün), sistem ani olarak termofilik bölge sıcaklığına (55 °C) ısıtılmıştır. Bu günden itibaren, 20 gün boyunca sistemin dengeye gelmesi beklenmiş ve besleme yapılmamıştır. Kısmen dengeye ulaşılan 176. günden sonra, besleme miktarı kademeli olarak artırılarak, literatüre uygun şekilde, termofilik bölge için bekletme süresi 12 günlük olarak gerçekleştirilmiştir (Stafford vd., 1981). Bu deneme süresinde günlük olarak üretilen biyogaz miktarı Şekil 4.9’ da görülmektedir.



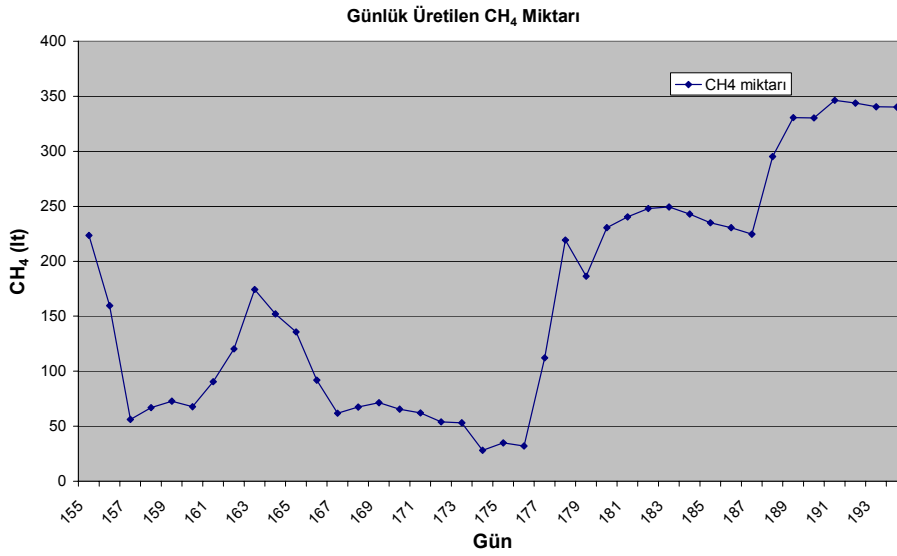
Şekil 4.9 Termofilik denemede günlük üretilen biyogaz miktarı

Şekil 4.9'dan görüleceği gibi, sıcaklık yükseltildiğinde, biyogaz üretimi keskin bir düşüş göstermiştir. Bu, metan bakterilerinin ani sıcaklık değişimlerinden etkilendiğiyle ilgili literatür bilgisiyle uyumludur (Jenangi, 1981; Alkhamis vd., 2000;). Sistem hızlı bir şekilde kendini toparlamış, yaklaşık 10 gün içinde dengeye gelmiştir. Besleme bu süre içerisinde yapılmamış, dengenin istikrarlı olması beklenmiştir. Beslemenin başlatıldığı 176. günden itibaren, biyogaz üretiminde paralel olarak artış başlamıştır. 189. günde, verim değerinin $2 \text{ m}^3\text{-biyogaz/m}^3\text{-reaktör.gün'e}$ ulaşmasından sonra, 194. günde deney sonlandırılmıştır. Elde edilen bu verim değeri termofilik reaktörler için verilen değerlerle uyumludur (Anon., 1997a; Boyd, 2000; Zupancic ve Ros, 2003).

Termofilik koşullarda gerçekleştirilen bu deneme sırasında da, üretilen biyogazın içeriği sürekli olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler Şekil 4.10'de, bu verilerle hesaplanan günlük metan üretimi ise Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.10 Termofilik denemede üretilen biyogazdaki CH₄ ve CO₂ oranları.

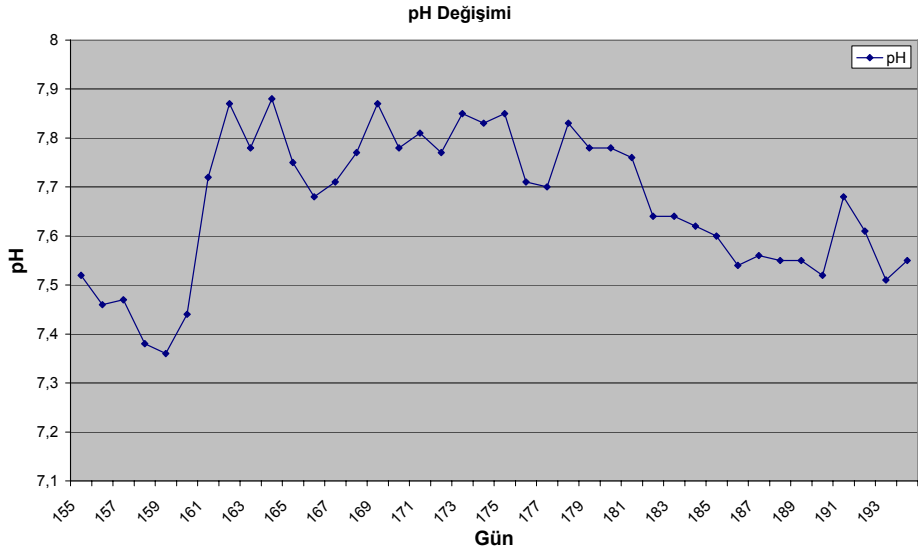


Şekil 4.11 Termofilik denemede üretilen CH₄ miktarı.

Şekil 4.10'dan görüleceği gibi, sıcaklığın yükseltilmesiyle birlikte, CH₄ oranı 5 gün boyunca hızlı bir şekilde düşmüş, daha sonra artarak % 55 civarında gerçekleşmiştir. CH₄/CO₂ oranındaki bu düşüş,

ani sıcaklık dalgalanmasıyla sistemin düzensizleştiğinin göstergesidir (Stafford vd., 1981; Marchaim, 1992). Günlük metan üretimi miktarına bakıldığında (Şekil 4.11), düşüşün 4 gün sürdüğü, daha sonra sistemin tekrar toparlandığı görülmektedir. Bu da, biyogaz üretimine fazla ara verilmeden, gerektiğinde çalışma sıcaklığının artırılabilceğini göstermektedir.

Bu deneme sırasında, ortam pH'ındaki değişim Şekil 4.12'de verilmiştir.



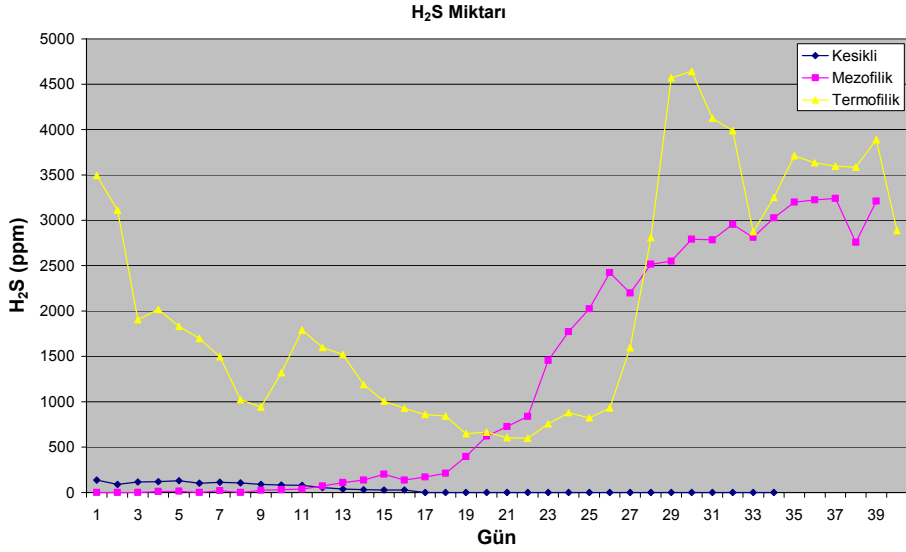
Şekil 4.12 Termofilik fermentasyon denemesi sürecinde ortamın pH değişimi

Sistemin düzensizleştiğinin göstergesi olan pH değeri, Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, sıcaklığın ani olarak artırılmasıyla düşmeye başlamış, 5. günden itibaren yükselerek 7,9 seviyelerine ulaşmıştır. pH değerinin bu derece yükselmesi, yükselen sıcaklıkla birlikte ortamdaki amonyak derişiminin artmasıyla açıklanabilmektedir (El-Mashad vd., 2003). Daha sonra pH değeri, biyogaz üretimi için uygun olan 7,5

civarına gerileyerek bu şekilde devam etmiştir. Bu denemeden de görüleceği gibi, pH değeri sistem dengesi bozulduğunda değişmekte, denge bozulmaya başlamadan önce bize bilgi vermemektedir. Bu nedenle, sistem otomasyonunda, CH_4/CO_2 oranı veya karışımın pH'ını 4 yapmak için gereken asit miktarı olarak tanımlanan alkalinite değeri, pH'a göre daha önemli kontrol parametreleridir (Çağlar ve Uçar, 1981; Klein, 2002).

Reaktör ortamı 155. günde, % 7,4 TK ve % 75 UK değerlerine sahipken, denemenin sonu olan 194. günde bu değerler, % 8,1 TK ve % 71 UK olarak gerçekleşmiştir. Bu deneme süresince de reaktör, % 12 TK, % 83 UK değerlerindeki, sığır atığı+su karışımı ile beslenmiştir.

Deneme süresince üretilen biyogazın içerdiği H_2S miktarı sürekli olarak takip edilmiştir. H_2S , özellikle içten yanmalı motorlarda korozyona neden olduğu için istenmeyen bir gazdır. Besleme materyalinin içeriğindeki protein ve sülfürlü bileşenlerin miktarına göre, H_2S üretimi değişmektedir. Genel olarak, biyogaz içerisindeki H_2S miktarı, 1500 – 5000 ppm arasındadır. Yüksek konsantrasyonlarda, sistemin inhibe olmasına neden olur. Oldukça reaktif olan bu gaz, sistemdeki dengesizliklerin de habercisidir (Muche ve Zimmermann, 1985; Hagen vd., 2001). Şekil 4.13'de, kesikli (A bölgesi), mezofilik (C bölgesi) ve termofilik (D bölgesi) denemelerde, H_2S miktarındaki değişimler verilmiştir.



Şekil 4.13 Denemeler sırasında biyogaz içerisindeki H_2S miktarının değişimi

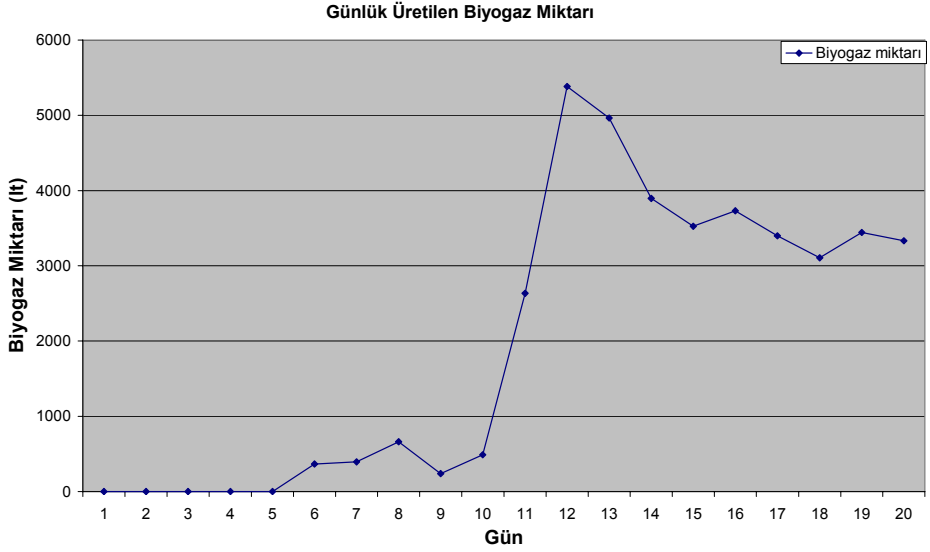
Kesikli deneme olarak adlandırdığımız, 1–35. günleri kapsayan deneme sırasında, Şekil 4.13’den de görüleceği gibi H_2S üretimi çok düşük değerlerdedir. Mezofilik sıcaklık bölgesindeki sürekli beslemenin yapıldığı denemede ise, beslemenin başlamasıyla H_2S üretimi artmış, tam yükte beslemeyle birlikte 3000 ppm seviyelerinde gerçekleşmiştir. Termofilik sıcaklığa (55 °C) geçiş sırasında 3500 ppm civarında olan H_2S , beslemenin kesildiği bölümde gerileyerek 500 ppm seviyelerinde seyretmiş, tam yükte beslemeyle birlikte 3500–4000 ppm değerlerine ulaşmıştır. Dikkat edileceği gibi H_2S üretimi, beslemeyle birlikte artış göstermektedir. Bunun nedeni, besleme materyaliyle birlikte sisteme verilen protein ve sülfürlü bileşenlerdir. Denemeler sırasında H_2S miktarı, normal aralık içerisinde yer almıştır. Şekil 4.13’den görüleceği gibi, termofilik denemede, mezofilik denemeye göre H_2S üretimi daha yüksek bir seviyededir. Bu da, termofilik reaktörlerde H_2S üretiminin daha fazla olduğu şeklindeki literatür bilgisiyle uyumludur (Vijayalekshmy, 1985).

4.1.2 5 m³ Kapasiteli Biyogaz Sisteminde Gerçekleştirilen Deneme

5 m³ kapasiteli, pilot ölçekli biyogaz sistemindeki deneme kesikli besleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sistem başlangıçta 5000 lt sığır atığı+su karışımı ile doldurulmuştur. Deneme süresince, günlük biyogaz üretimi, üretilen biyogaz içerisindeki gazların miktarları günlük olarak ölçülmüştür. Isıtmanın üretilen biyogazla yapıldığı bu çalışmada, günlük olarak tüketilen biyogaz miktarı da kaydedilmiştir. Denemenin kesikli olarak gerçekleştirilmesinin nedeni, bu kapasitede günlük besleme için gerekli yaklaşık 125 kg sığır atığının temininindeki güçluktur.

Denemede amaç, reaktör ve gaz depolama tankının üretildiği fiberglass malzemenin, işletme şartlarındaki davranışının tespiti. Özellikle çalışma basıncı ve sıcaklığında, reaktörde ve gaz depolama tankında meydana gelebilecek olası arızalar takip edilmiştir. Hidrolik karıştırma sıklığı ve süresi değiştirilerek, biyogaz üretim verimi ve reaktör sıcaklığındaki dalgalanmalar gözlenmiş, pompanın zamanlayıcısı bu gözlemler ışığında ayarlanmıştır.

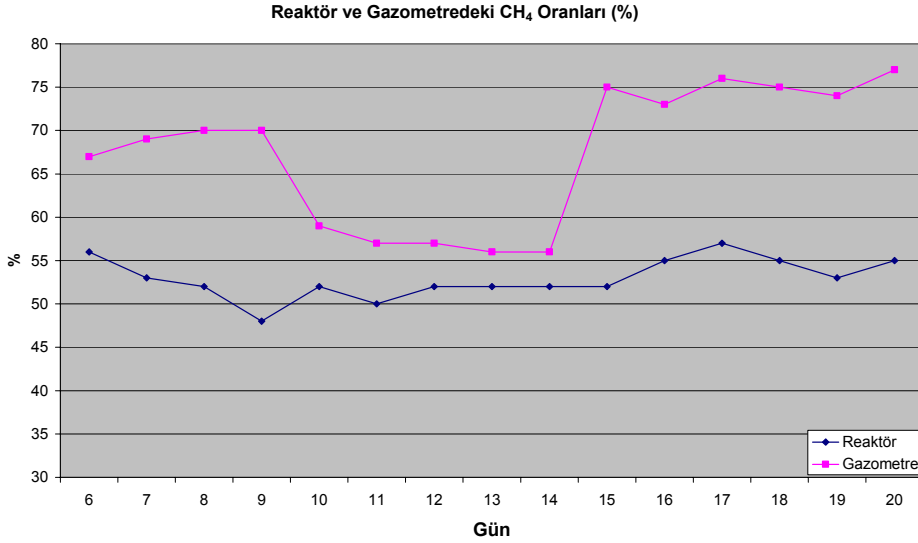
Deneme 20 gün sürdürülmüştür. Şekil 4.14'deki günlük biyogaz üretimi grafiğinden görüleceği gibi, ilk 5 gün, reaktör çıkışlarındaki kaçaklar giderilemediğinden sağlıklı bilgi alınamamıştır. Ayrıca, yardımcı bir ısıtıcının olmaması nedeniyle reaktör ısıtılmamış, ortam sıcaklığında fermentasyon başlatılmıştır. Isıtma için gerekli olan biyogazın üretildiği 9. günden sonra reaktör ısıtılmaya başlamış, sıcaklık 37 °C'de sabitlenmiştir. İlk dokuz gün için reaktör sıcaklığı 34–36 °C aralığında salınım göstermiştir.



Şekil 4.14 Günlük olarak üretilen biyogaz miktarı

Şekil 4.14'den görüleceği gibi 7.günden sonra biyogaz üretiminde artış gözlenmiştir. Çalışmanın 5–10. günleri arasında, başlayan biyogaz üretiminin, gündüz 12:00 civarında durduğu ve gece saatlerinde yeniden başladığı gözlenmiştir. Beş gün boyunca bu durumun devam etmesi üzerine, konu üzerinde inceleme yapılmış, reaktör üzerinde bulunan 2”'lik iki çıkış üzerinde şeffaf hortum bulunduğu, buradan giren güneş ışığının anaerobik şartlarda hidrojen üretimine neden olarak, H_2 'nin kısmi basıncını artırdığı sonucuna varılmıştır. Bu basınç artışı sistemin inhibe olmasına neden olmaktadır (Klein, 2002). Bu nedenle şeffaf hortumlar alüminyum folyo ile kaplanmış, takip eden günlerde biyogaz üretimi yükselmiştir.

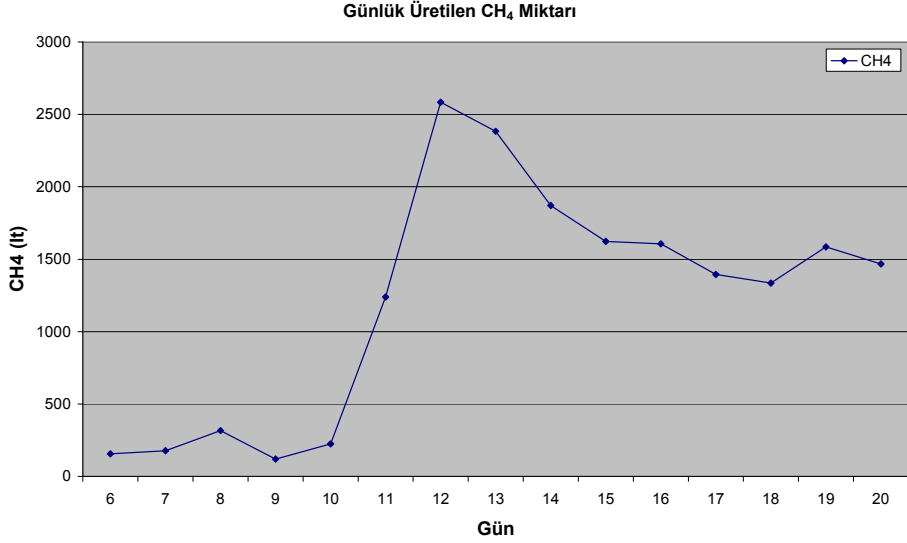
Deneme süresince, reaktör ve gazometrede bulunan biyogazın içerisindeki CH_4 oranı, Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15 Reaktör ve gaz depolama tankındaki biyogazın CH₄ ve CO₂ oranları

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, üretilen biyogazın içerisindeki metan oranı, küçük salınımlarla % 55 civarında gerçekleşmiştir. İlk 5 günün verilerinin alınamaması, fermentasyonun başlangıcında görülen düşük metan oranının tespit edilememesine yol açmıştır. Denemenin 14. gününe kadar, fiberglass gazometredeki kaçakların giderilmesine çalışılmıştır. Bu nedenle üretilen biyogaz, 5 m³’lük metal gazometrede toplanmıştır. Daha sonra fiberglass gazometrede toplanan biyogaz, bu gazometrede bulunan santrifüj pompanın çalıştırılmasıyla, üzerinden su geçirilerek arıtılmıştır. Şekil 4.15’e dikkat edilecek olursa, metal gazometrede CO₂ gideriminin giderek düştüğü, reaktörde ve gazometrede bulunan biyogazın CH₄ oranlarının, birbirine yaklaştığı görülecektir. Biyogazın fiberglass gazometreye alındığı 14. günden sonra, reaktör ve gazometrenin metan oranları, önemli ölçüde farklılaşmıştır. Fiberglass gazometrede CO₂ giderimi, yaklaşık % 20 civarında gerçekleşmiştir.

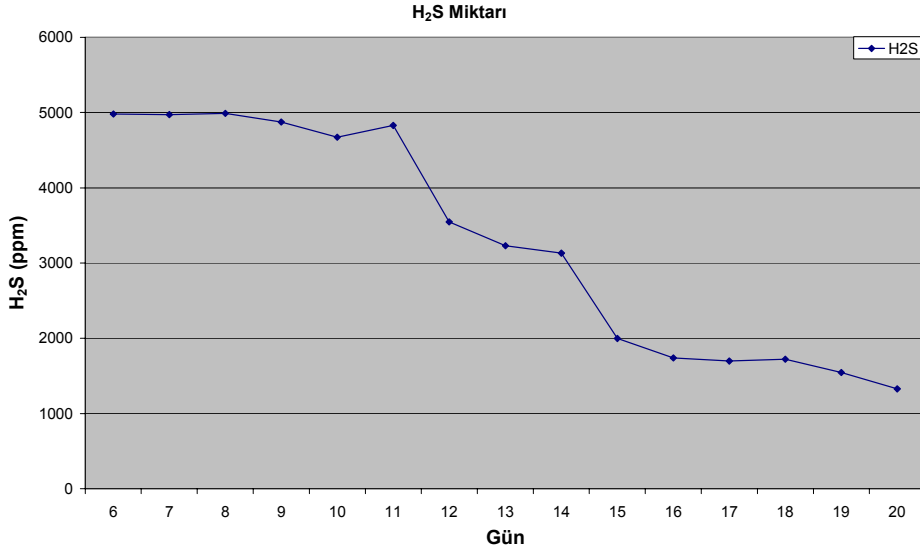
Bu oranlara göre günlük olarak üretilen metan miktarı, Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16 Günlük olarak üretilen metan miktarı

Deneme süresince elde edilen toplam metan miktarı, 18.077 lt olarak gerçekleşmiştir. Bu değer, beklenenden yaklaşık % 30 daha azdır. Fermentasyonun başlangıcında, reaktördeki kaçakların giderilememesinin ve reaktör içerisine güneş ışığının girmesinin, bu sonuçlarda etkili olduğu düşünülmektedir.

Üretilen biyogaz içerisindeki H₂S miktarı Şekil 4.17'de görülmektedir. Verilerin alınmaya başlandığı 6. günde, yaklaşık 5000 ppm düzeyinde olan H₂S miktarı, sürekli azalarak, denemenin sonlandırıldığı 20. günde 1000 ppm seviyelerine inmiştir.



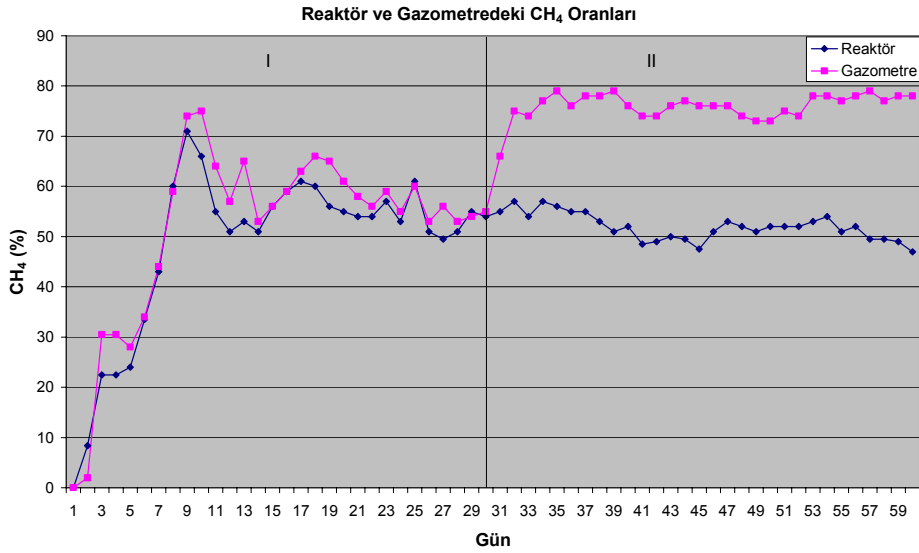
Şekil 4.17 H₂S üretimi

Bu denemede özellikle fiberglass malzemenin, fermentasyon süresince davranışı incelenmiş, gerek reaktör gerekse gazometre yapımında kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Başlangıçta karşılaşılan kaçaklarla ilgili sorunların, gaz çıkışlarındaki küçük değişikliklerle giderilebileceği görülmüştür.

4.2 Biyogaz Depolama Tankında Gaz Arıtımıyla İlgili Denemeler

Proje kapsamında oluşturulan gaz depolama sisteminde, gaz arıtımıyla ilgili denemeler, 0,28 m³ kapasiteli pilot ölçekli sistemde gerçekleştirilen biyogaz üretim denemeleriyle paralel olarak yürütülmüştür. Denemelerde, biyogaz üzerinden nozullar aracılığıyla geçirilen su miktarı, pompa çalışma süresi ve sıklığı değiştirilerek, CO₂ ve H₂S giderim verimine bakılmıştır.

İlk deneme 60 gün devam etmiştir. Deneme süresince, reaktör ve gazometrede bulunan biyogazın içerdiği CH_4 , CO_2 ve H_2S oranlarına bakılmış, gazometrede bulunan suyun pH değeri günlük olarak ölçülmüştür. Bu denemede elde edilen CH_4 oranları, Şekil 4.18’de verilmiştir.

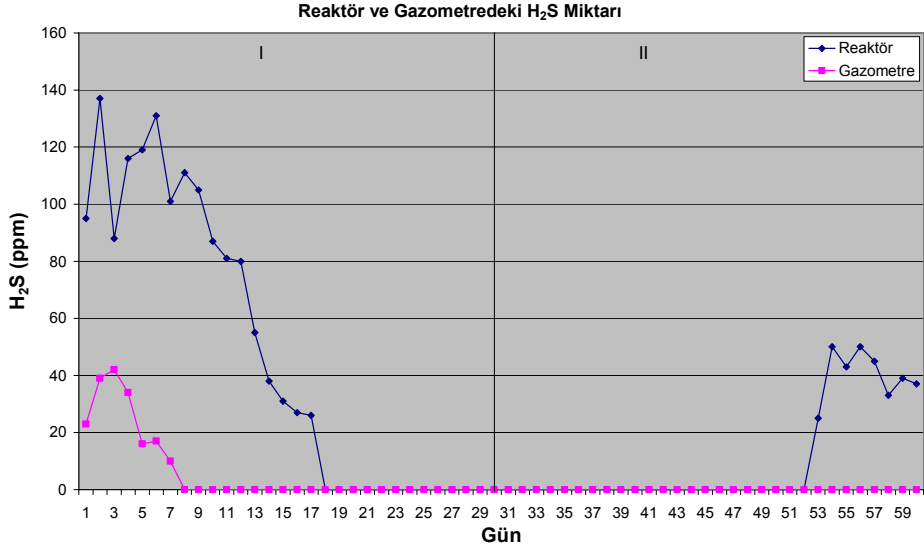


Şekil 4.18 Reaktör ve gazometredeki CH_4 oranları

Ölçüm günlük olarak alınmış ve her gün gazometre içerisindeki gaz tamamen boşaltılmıştır. Gazometrenin üst deposundaki suyu biyogazın üzerinden geçirmek için, $4 \text{ m}^3/\text{h}$ debi, 14 mSS basma yüksekliğine sahip, santrifüj pompa kullanılmıştır. Pompa günde 3 defa, 10 dakika süreyle çalıştırılmıştır. Denemenin ilk 30 gününde pompa çalıştırılmamıştır. Daha sonraki 30 günde pompa çalıştırılmıştır. Bu bölgeler Şekil 4.18’de çizgiyle ayrılarak gösterilmiştir. İlk 30 günde reaktördeki ve gazometredeki CH_4 oranı hemen hemen aynı oranlarda devam etmiştir. Pompanın çalışmaya başlamasıyla birlikte, gazometredeki CH_4 oranı hızla yükselmiş, ortalama % 77 değerinde

devam etmiştir. Bu aralıkta, reaktördeki biyogazın CH_4 oranı, yaklaşık % 51 civarında gerçekleşmiştir. Bu farkın nedeni, CO_2 'nin suda CH_4 'e göre daha fazla çözünmesidir. 1 atm basınçta ve 21 °C'de 1 lt suda 1,8 gr CO_2 çözünürken, sadece 4 mg CH_4 çözünmektedir (Krich vd., 2005). Pompanın çalıştırılmadığı I. Bölgede de, suyun gazometredeki doğal çevriminden kaynaklanan CO_2 arıtımı söz konusudur. Fakat dikkate alınmayacak kadar düşük oranlardadır. Diğer bölgede ise, gazometrenin atmosfere açık üst deposunda, içerisinde çözünen CO_2 'i atmosfere salan su, bir pompa yardımıyla, biyogazın depolandığı alt depoya üstten verilmekte, çözülmüş CO_2 miktarı yoğun olan gaz üst depoya geçerek, CO_2 'sini atmosfere bırakmaktadır. Bu çevrim sonucunda CO_2 giderilmektedir. Bu düşünceyi doğrulamak için, gazometrenin alt ve üst depolarından alınan aynı miktardaki su örnekleri, vakumlu etüve alınarak, ısıtılmadan, vakum halindeki davranışları incelenmiştir. Bu deneyde alt depodan alınan su örneğinin, üst depodan alınana göre daha düşük vakum değerlerinde içerisinde bulunan çözülmüş gazları bıraktığı görülmüştür. Etüvün vakumlanan havası gaz analizöründen geçirilmiş, içerisinde % 5 CO_2 tespit edilirken % 0,1 civarında CH_4 'e rastlanmıştır. Bu sonuçlar, gazometrede gaz arıtımıyla ilgili teorimizi desteklemektedir.

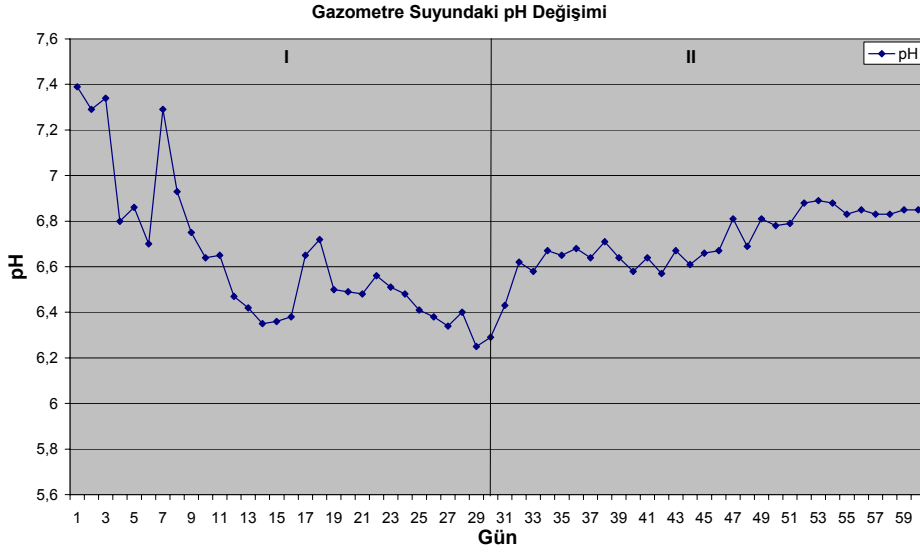
Aynı çalışma aralığında, hem reaktör hem de gazometre içerisindeki biyogazda bulunan H_2S miktarı da ölçülmüştür. Biyogaz içerisindeki H_2S , korozyon etkileri nedeniyle istenmeyen bir gazdır. H_2S de CO_2 'i gibi, suda CH_4 'e göre daha fazla çözünmektedir (Krich vd., 2005). Deneme süresince H_2S açısından Elde edilen veriler Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19 Deneme süresince reaktör ve gazometre içerisindeki biyogazın H₂S miktarları

Şekil 4.19'dan görüleceği gibi, gazometrede CO₂'nin yanı sıra H₂S giderimi de söz konusudur. Kesikli olarak çalıştırılan reaktöre ait olan bu verilere göre, son aşamadaki 40 ppm'lik seyir dışında, yükleme yapıldığında H₂S üretiminin başladığı, ortalama 120 ppm olan bu değerin karşılığında, gazometredeki H₂S miktarının yaklaşık 35 ppm'e gerilediği görülmektedir. Şekil 4.19'dan görülen diğer önemli bir nokta ise, H₂S gideriminin, I. ve II. bölgelerde, yani pompanın çalışmadığı ve çalıştığı deneme aralıklarında, değişiklik göstermediğidir. Buna, H₂S'in suda çözünmesi ile sülfürlü bileşenlerin oluşması ve bu bileşenlerin sudan uzaklaştırılamamasının neden olduğu düşünülmektedir.

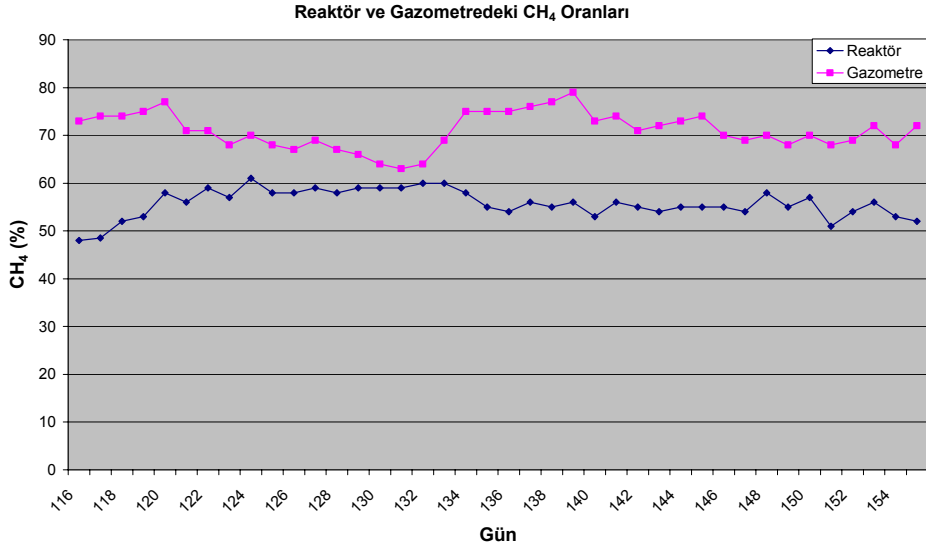
CO₂ ve H₂S'in suda çözünmesiyle, gazometredeki suyun hafif asitik olacağı beklenmiştir. Bu nedenle, gazometrede bulunan suyun pH değeri, günlük olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu denemede elde edilen pH değerleri Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20 Gazometredeki suyun pH değerinin değişimi

Gazometredeki suyun pH değeri, biyogaz üretiminin başlamasıyla düşmeye başlamış, birkaç dalgalanma dışında, bu düşme eğilimi pompanın çalıştırılmadığı I. bölge boyunca devam etmiştir. Pompanın çalıştırılmasıyla birlikte bu değer yavaş yavaş yükselmeye başlamıştır. Bu da içerisinde çözünen CO_2 'in atmosfere salınmasıyla açıklanabilir.

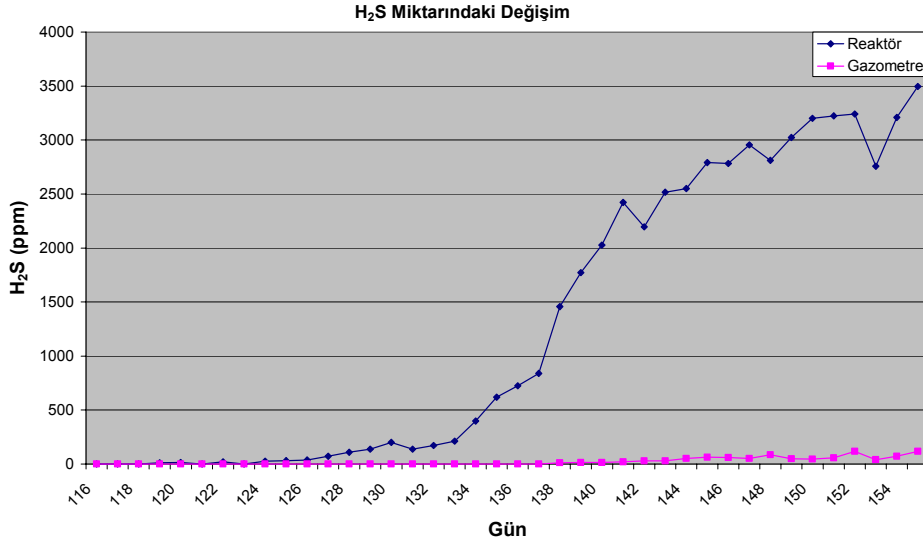
Biyogaz arıtımıyla ilgili ölçümler, mezofilik bölgede sürekli beslemenin yapıldığı biyogaz üretim denemesinde de devam etmiştir. Pompa değiştirilmiş ve debisi $1 \text{ m}^3/\text{h}$, basma yüksekliği 7 mSS olan bir sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Çalışma sıklığı günde 6 defaya, çalışma süresi 15 dakikaya yükseltilmiştir. Bu deneme süresince, reaktör ve gazometrede ölçülen CH_4 oranları Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.21 Mezofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın CH₄ içeriği

Şekil 4.21'den görüleceği gibi, gazometrede CO₂ giderimi bu denemede daha az olmuştur. Pompanın değiştirilmesiyle, günlük sirküle edilen su miktarının azalmasının, bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Buna rağmen, reaktör içerisinde % 55 civarında gerçekleşen CH₄ oranı, gazometrede ortalama % 70 olmuştur.

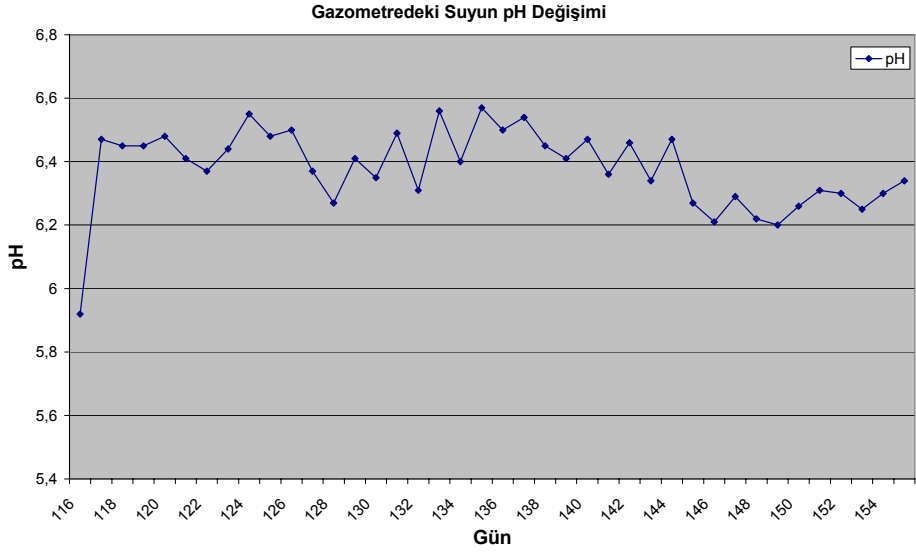
Reaktördeki ve gazometredeki biyogazın içerdiği H₂S miktarındaki değişikliklerle ilgili veriler Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22 Mezofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın H_2S içeriği

Reaktörde H_2S üretimi, tam yükte beslemenin başlamasıyla birlikte artmaya başlamış, 3500 ppm'e kadar yükselmiştir. Şekil 4.22'den görüleceği gibi, gazometrede H_2S miktarı, reaktördekiye göre oldukça düşük seviyede gerçekleşmiştir. En yüksek değeri 118 ppm olmuştur. Motor üreticileri, kullanılan biyogazdaki H_2S içeriğinin üst sınırını 1500 ppm olarak vermektedirler (Mitzlaff, 1988). Gazometredeki H_2S miktarı, bu değerin oldukça altındadır.

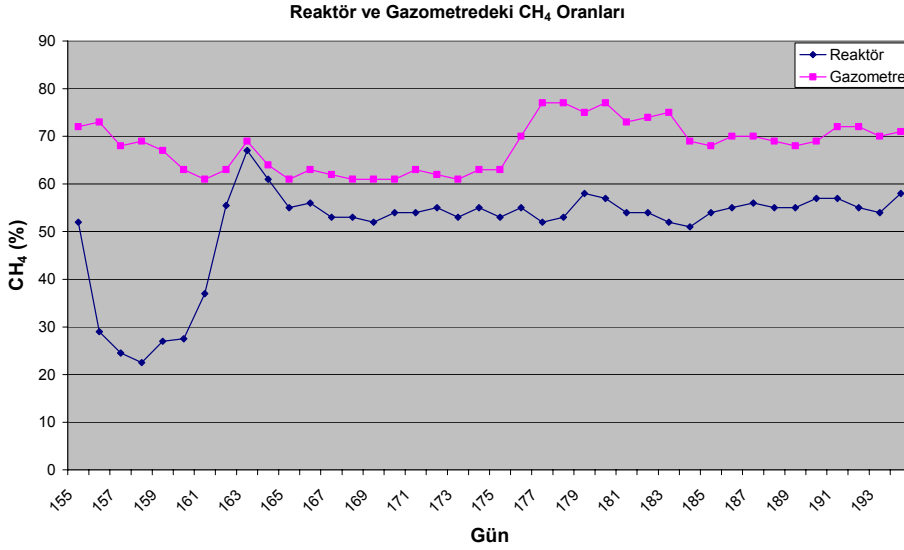
Bu deneme sırasında, gazometredeki suyun pH değişim grafiği, Şekil 4.23'da görülmektedir.



Şekil 4.23 Mezofilik sürekli beslemeli denemede, gazometredeki suyun pH değişimi

Şekil 4.23’den görüleceği gibi, gazometredeki suyun pH’ı büyük bir değişim göstermemiş, ortalama 6,4 civarında gerçekleşmiştir. Fakat, özellikle H_2S üretiminin yüksek olduğu zaman diliminde, beklendiği gibi pH değeri de bir miktar azalmıştır.

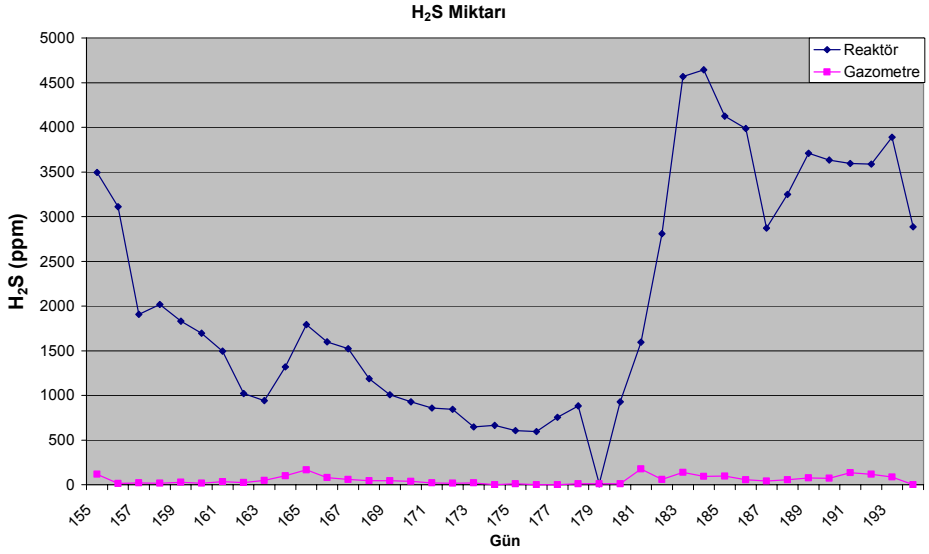
Gazometredeki çalışmaların son bölümü, reaktörün termofilik sıcaklık bölgesinde, sürekli beslemeli olarak çalıştırıldığı biyogaz üretim denemesinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneme sırasında da, pompanın çalışma koşulları, bir önceki denemedekilerle aynı bırakılmıştır. Bu denemenin önemi, mezofilik bölgeden (37 °C) termofilik bölgeye (55 °C) ani geçişe bağlı olarak düşen CH_4 oranının, gazometrede yaratacağı etkinin görülebilmesidir. Şekil 4.24’de, bu deneme süresince reaktör ve gazometrede ölçülen CH_4 oranları görülmektedir.



Şekil 4.24 Termofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın CH₄ içeriği

Bu denemenin başlangıcında, ani sıcaklık değişimine bağlı olarak, üretilen biyogazın içerisindeki CH₄ oranı hızla düşmüş, % 22 seviyelerine gerilemiştir. Şekil 4.24’de görüleceği gibi, gazometrede bu oran çok fazla değişmemiş, en çok % 60 düzeyine inmiştir. Sistemin düzensizleştiği dönemlerde, CH₄ oranının, biyogazın enerji dönüşümü amaçlı kullanımının imkansız olduğu seviyelere inmesi, işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Geliştirilen gazometre ile bu dalgalanmaların giderilebilmesi, işletme yönünden önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Denemenin son gününe kadar, gazometredeki CH₄ oranı istikrarlı bir yapı göstermiş, reaktör içerisinde % 55 seviyelerinde ölçülen bu değer, gazometrede % 70 civarında gerçekleşmiştir.

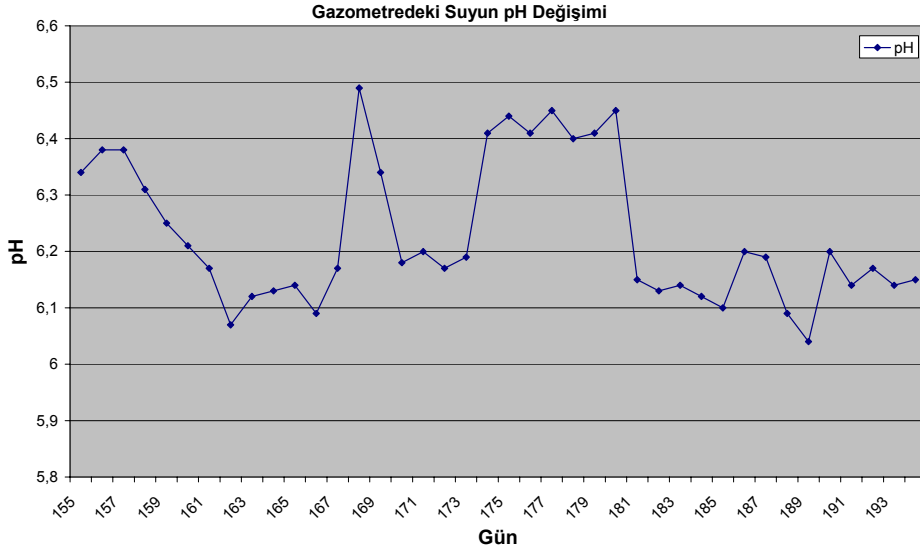
Şekil 4.25’de, bu deneme süresince, reaktör ve gazometrede ölçülen H₂S miktarları verilmiştir.



Şekil 4.25 Termofilik sürekli beslemeli denemede, reaktör ve gazometredeki biyogazın H_2S içeriği

Bu denemede de, reaktördeki H_2S oranı, tam yükte beslemenin başlatıldığı dönemde artmış, ortalama 3500 ppm gibi yüksek bir değere ulaşmıştır. Fakat Şekil 4.25’den görüleceği gibi, gazometrede bu değer en fazla 181 ppm olmuş, genel olarak 100 ppm’in altında gerçekleşmiştir.

Gazometredeki suyun pH değerinin değişimi Şekil 4.26’da görülmektedir. Bu değer ortalama 6,3 seviyelerinde devam etmiş, H_2S üretiminin ve buna bağlı olarak gideriminin arttığı zaman diliminde, yani 180. günden sonra pH değeri düşerek, 6,1 civarında gerçekleşmiştir.

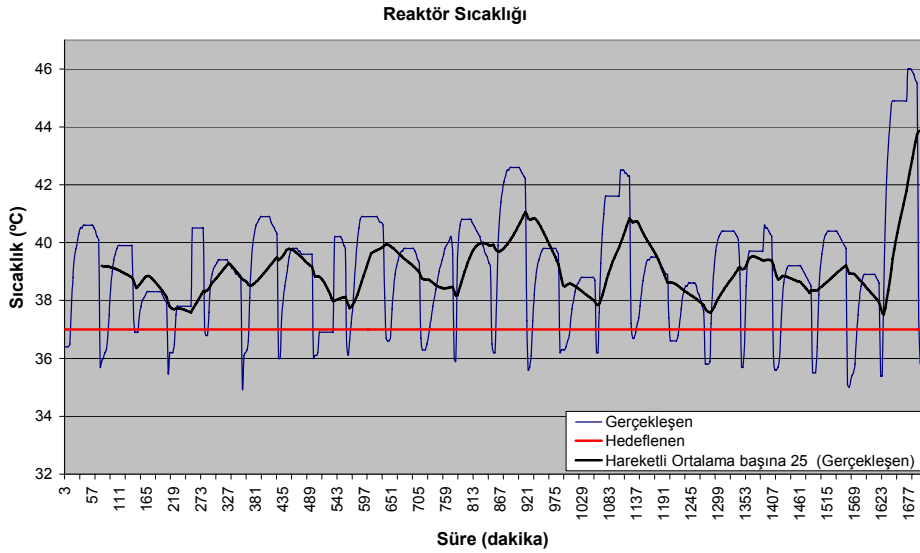


Şekil 4.26 Termofilik sürekli beslemeli denemede, gazometredeki suyun pH değişimi

4.3 Reaktör Sıcaklığındaki Dalgalanmaların Önlenmesiyle İlgili Denemeler

Bu deneme güneş enerjisi destekli, 280 lt kapasiteli, pilot ölçekli biyogaz sisteminde gerçekleştirilmiştir. Güneş ışıınının yüksek, ısı kaybının düşük olduğu dönemlerde, güneş enerjisi sisteminde bulunan sıcak su akümülayon tankındaki sıcaklık değeri yükselmektedir. Özellikle güneş enerjisi desteğinin kış şartlarına göre dizayn edildiği sistemlerde bu durumla karşılaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki suyun, reaktördeki ısı eşanjörüne gönderilmesi, sıcaklığın basit bir termostatla kontrol edildiği sistemlerde, ani sıcaklık değişimlerine neden olmaktadır. Reaktör sıcaklığındaki ani değişimler, metan üretimini olumsuz etkilemektedir (Jenangi, 1981; Alkhamis vd., 2000). Denemelerin gerçekleştirildiği pilot ölçekli sistemde, sıcaklık kontrolü 0,1 °C çözünürlükte bir termostatla sağlanmaktadır. Denemeler süresince karıştırma, kauçuk loblu pompa yardımıyla, saatte bir, 15 dakika olarak

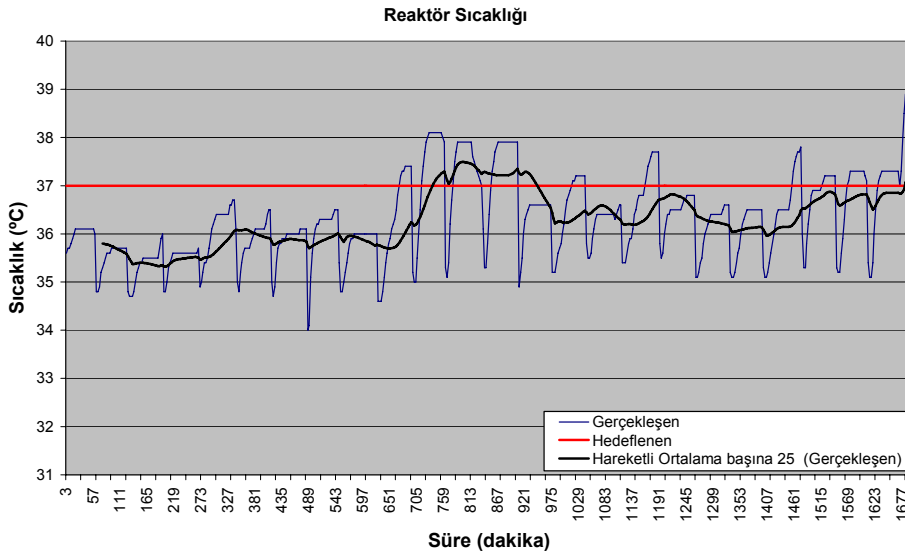
gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen sıcaklık dalgalanmalarını yaratmak amacıyla, sistemde bulunan sıcak su akümülayon tankının sıcaklığı, elektrikli ısıtıcı yardımıyla 90 °C'ye çıkarılmıştır. Daha sonra 3 dakika aralıklarla reaktör sıcaklığındaki değişimler kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Sıcaklık kontrolünde bir termostadın kullanılması durumunda reaktör sıcaklığında meydana gelen değişimler

Şekil 4.27'de görülen periyodik sıcaklık düşümleri, karıştırma nedeniyle oluşan yapay düşümlerdir. Bu sıcaklık düşümlerinde, sirkülasyon pompası devreye girmekte, istenen sıcaklığa ulaşıldığında pompanın durmasına rağmen, reaktör sıcaklığı yükselmektedir. Bu şekilde reaktör sıcaklığının 46 °C'ye kadar yükseldiği kaydedilmiştir. Sıcaklıktaki salınımın daha iyi görülebilmesi için, gerçekleşen değerlere eğilim çizgisi eklenmiştir. Bu eğriden görüleceği gibi, reaktör sıcaklığı, hedeflenen sıcaklıktan (37 °C) önemli ölçüde sapmaktadır.

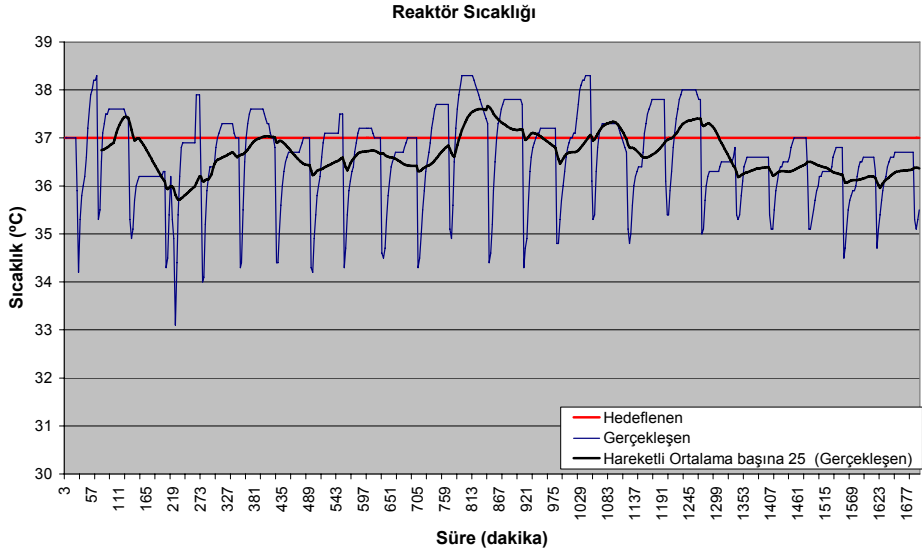
Daha sonra sisteme, aynı özelliklerde ikinci bir termostat seri olarak eklenmiş, bu termostatla ısıtma ceketinin sıcaklığı da kontrol edilmiştir. İkinci termostatın sıcaklık ayarı $35,5 \pm 0,1$ °C olacak şekilde ayarlanmış ve deneme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 İkinci termostatın 35,5 °C’ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi, yukarıya doğru olan sıcaklık dalgalanmaları azalmış, fakat reaktör sıcaklığı 37 °C’nin altında kalmıştır. Eğilim çizgisinde bu durum daha belirgindir.

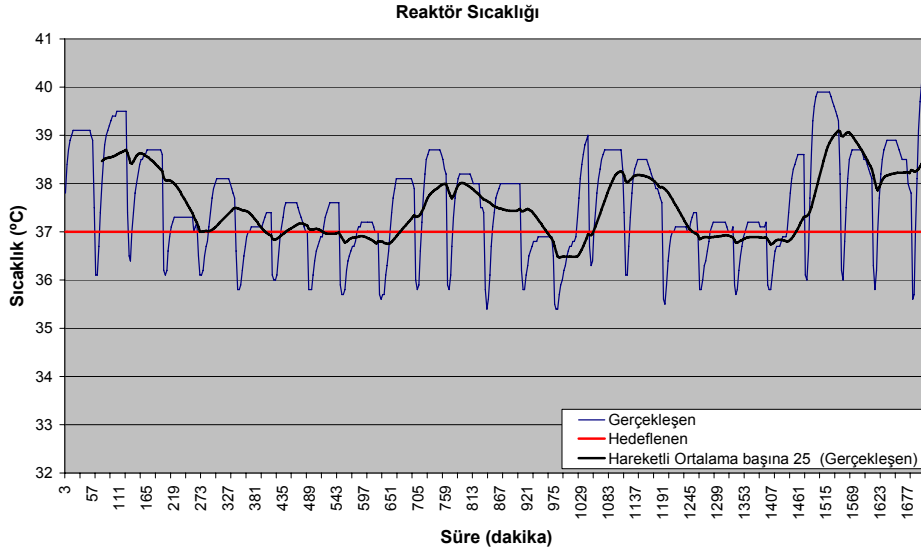
Sonraki denemede, ikinci termostatın sıcaklık ayarı 36 °C’ye getirilmiştir. Bu deneme sonucu oluşan sıcaklık değişimi Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29 İkinci termostatin 36 °C'ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler

İkinci termostatin 36 °C'ye ayarlanması sonucunda, yukarıya doğru olan sıcaklık salınımları engellendiği gibi, reaktör sıcaklığı 37 °C civarında gerçekleşmiştir. Şekil 4.29'daki eğilim çizgisinde bu durum açıkça görülmektedir. Bu denemede en yüksek reaktör sıcaklığı 38,3 °C olmuştur.

Son denemede, ikinci termostatin sıcaklığı 36,5 °C'ye ayarlanmıştır. Diğer denemelerle aynı koşullarda gerçekleştirilen bu denemede elde edilen sonuçlar, Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 İkinci termostatin 36,5 °C'ye ayarlandığı denemede, reaktör sıcaklığında gerçekleşen değişimler

Şekil 4.30'dan görüldüğü gibi, bu sıcaklık ayarında, reaktör sıcaklığında istenmeyen yükselmeler meydana gelmiştir. Gerçekleşen değerlere ait eğilim çizgisine baktığımızda, reaktör sıcaklığının 37 °C'nin 1-2 °C üzerinde seyrettiği görülmektedir. Bazı noktalarda bu sıcaklık, 40 °C ve üzerine ulaşmıştır.

Gerçekleştirilen denemeler, sisteme ısı eşanjörü sıcaklığını kontrol amaçlı ikinci bir termostat eklenmesiyle, sıcaklık salınımlarının yeterli miktarda azaltılabildiğini göstermektedir. Denemenin yapıldığı sistemde, termostata ait sıcaklık sensörü, ısıtma ceketinin yüzeyine konulmuştur. 36 °C olarak bulunan en uygun sıcaklık ayarı, sadece bu sistem için geçerlidir. Her sistem için bu ayar, sensörün konumuna, eşanjörün tipine göre değişecek, fakat bir kaç denemeden sonra rahatlıkla tespit edilebilecektir. Sıcaklığın bu şekilde iki termostat yardımıyla

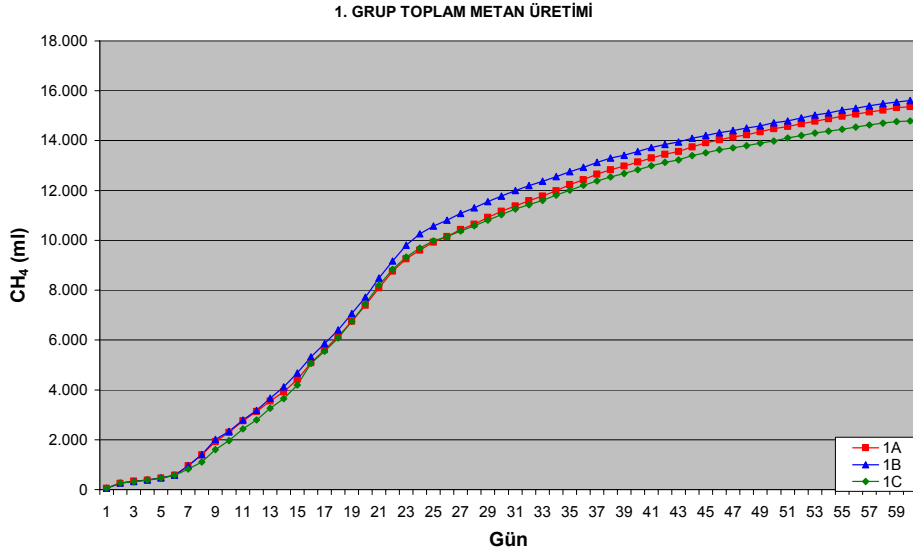
sabitlenebilmesi, karmaşık otomasyon sistemlerine göre hem yatırım maliyetlerini düşürecek, hem de işletim kolaylığı sağlayacaktır.

4.4 Basınç Etkisi İle İlgili Denemeler

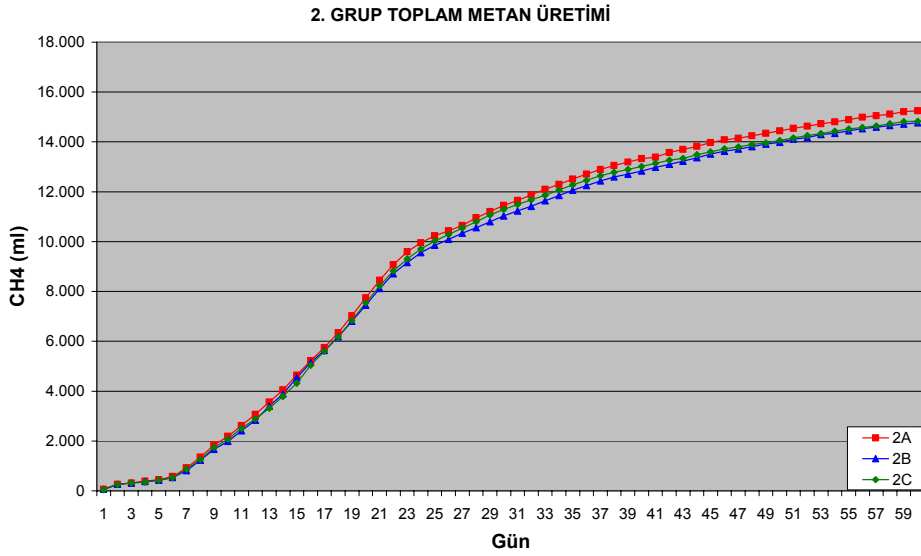
Denemede kullanılan reaktörler, çalışma basınçlarına göre üç gruba ayrılmıştır:

1. Grup: $\approx 19,6$ kPa (mutlak)
2. Grup: $\approx 9,8$ kPa (mutlak)
3. Grup: $\approx 1,5$ kPa (mutlak)

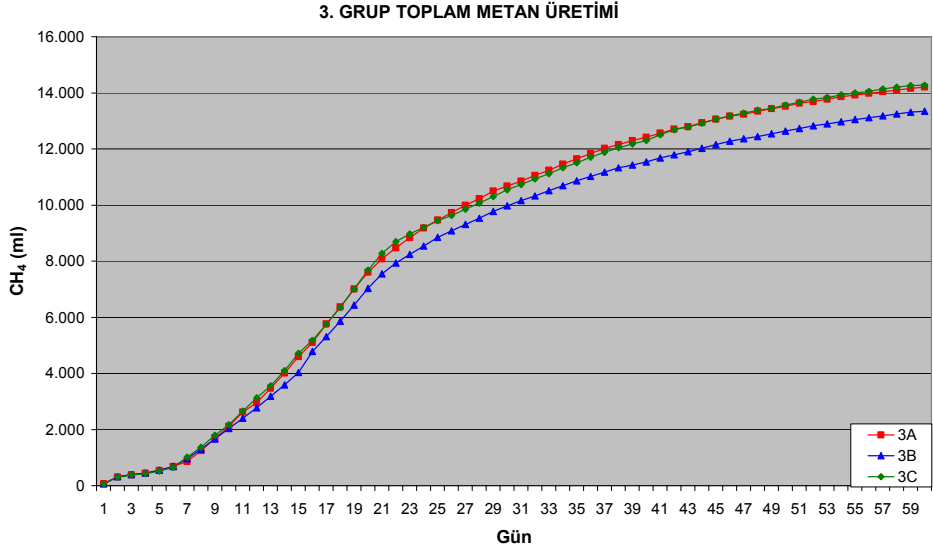
Her grupta üç paralel reaktör bulunmaktadır. Denemeler sonucunda elde edilen toplam metan miktarları, her grup için Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de verilmiştir. 1. gruptaki 1A, 1B ve 1C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı sırasıyla, 15.361 ml, 15.607 ml ve 14.786 ml’dir. Bu reaktörlerden elde edilen fermente atığın TK madde oranları yine sırasıyla, % 5,8, % 5,2 ve % 5,4 olarak bulunmuştur. 2. grup için metan üretim değerleri 2A, 2B ve 2C reaktörleri için sırasıyla, 15.240 ml, 14.765 ml ve 14.830 ml olarak gerçekleşmiştir. Aynı reaktörler için fermente atık TK madde oranları ise, % 6,7, % 6,2 ve % 6,5 olmuştur. Metan üretiminin diğer gruplara göre biraz daha düşük seyrettiği 3. grup 3A, 3B ve 3C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarları ise yine sırasıyla, 14.206 ml, 13.343 ml ve 14.268 ml’dir. TK madde oranları aynı sırayla, % 6,9, % 6,7 ve % 6,8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.31 1. Grup için 1A, 1B ve 1C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı

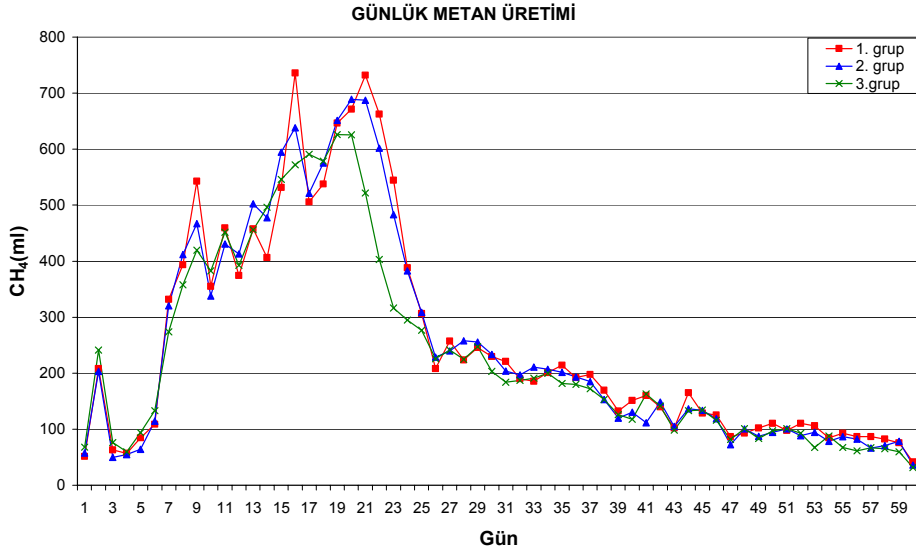


Şekil 4.32 2. Grup için 2A, 2B ve 2C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı

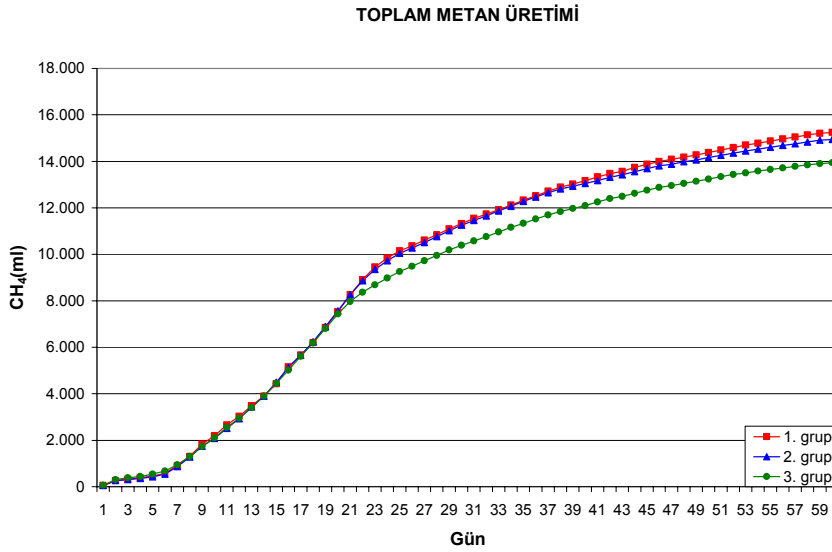


Şekil 4.33 3. Grup için 3A, 3B ve 3C reaktörlerinden elde edilen toplam metan miktarı

Her grup için paralel reaktörlerin metan üretim ortalamaları alınarak çizilen karşılaştırmalı günlük ve toplam metan üretim grafikleri, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’de görülmektedir. Günlük metan üretim grafiği (Şekil 4.34) incelendiğinde, her grubun 20–21. günlerde bir pik değere ulaştığı ve daha sonra metan üretiminin hızla düştüğü görülmektedir. Şekil 4.35’den de izlenebileceği gibi, 1., 2. ve 3. grup için toplam metan üretim değerleri sırasıyla, 15.251 ml, 14.945 ml ve 13.939 ml olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.34 1., 2. ve 3. grupların günlük metan üretim miktarı



Şekil 4.35 1., 2. ve 3. grupların toplam metan üretim miktarı

Anlamlılık seviyesinin $P < 0,05$ olarak kabul edildiği LSD (least significant difference) testinin uygulanması sonucunda, gruplar arasında metan üretimi bakımından anlamlı bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, istatistiksel olarak anlamlı olmamasına rağmen, en düşük sistem basıncına sahip ($\approx 1,5$ kPa) 3. grubun üretim değerlerinin, diğer gruplara göre daha düşük seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, 1,5 kPa mutlak basınç üzerindeki basınçların, metan üretimini zorlaştırdığı şeklindeki literatür bilgisini desteklememektedir (Arnott, 1985). Toplam biyogaz üretiminde, basınca göre düzeltilmemiş ham değerler incelendiğinde, 1.grup, 2.grup ve 3.grup için ortalama değerler, sırasıyla, 22.903 ml, 24.928 ml ve 25.493 ml olarak gerçekleşmiştir. Yine aynı gruplar için, toplam biyogaz üretim ortalamaları alındığında biyogaz içerisinde metan oranları 1., 2. ve 3. grup için sırasıyla, % 62,6, % 61,5 ve % 60,5 olarak bulunmuştur. Bu farkın, CO_2 'in CH_4 'e göre suda daha fazla çözünmesi ve bu çözünmenin basınç artışıyla fazlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu da, 1,5 kPa basınç değerini metan üretiminde sınır değer alan yorumların, bu etkiler göz önüne alınmadan yapıldığını düşündürmektedir.

4.5 Biyogazın Kullanımına Yönelik Çalışmalar

Bu bölümde, üretilen biyogazın kullanıldığı cihazlarla ilgili verimlilik denemeleri yapılmıştır. Çalışmalar biyokütle laboratuvarında, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilen, üç yakıcı gaz ocağında ve 2,2 kW gücündeki, 4 zamanlı içten yanmalı motora sahip elektrik jeneratörüyle gerçekleştirilmiştir.

Gaz ocağıyla yapılan denemelerde, ocağın her bir yakıcısında 60 °C ve 80 °C olmak üzere farklı iki sıcaklığa ısıtılan, kütlesi ölçülmüş su kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 Gaz ocağında gerçekleştirilen verim deneyinin bulguları

Deneme	İlk Sıcaklık $T_1(^{\circ}\text{C})$	Son Sıcaklık $T_2(^{\circ}\text{C})$	Süre t (s)	Gaz Tüketimi $V_B(\text{m}^3)$	Buharlaşma Miktarı $m_b(\text{kg})$
I. Yakıcı 60 $^{\circ}\text{C}$	30,4	61,2	628	0,015	0,01537
I. Yakıcı 80 $^{\circ}\text{C}$	30,68	80,41	837	0,022	0,01851
II. Yakıcı 60 $^{\circ}\text{C}$	30,61	60,43	1290	0,015	0,00952
II. Yakıcı 80 $^{\circ}\text{C}$	-	-	-	-	-
III. Yakıcı 60 $^{\circ}\text{C}$	30,61	60,70	554	0,012	0,00526
III. Yakıcı 80 $^{\circ}\text{C}$	30,85	80,45	1009	0,022	0,01914

Denemelerde kullanılan biyogaz, % 57 CH_4 , % 43 CO_2 içermektedir, sıcaklığı 37 $^{\circ}\text{C}$ ve toplam basıncı $p_t = 40$ mbar'dır. Denemenin yapıldığı ortamda atmosfer basıncı 1003 mbar'dır. Denemelerde ısıtılan suyun miktarı $m_s = 1$ kg'dır. Hesaplamalarda suyun özgül ısı kapasitesi $C_s = 4,2$ kJ/kg.K, buharlaşmayla kaybedilen ısı enerjisi $L_b = 2260$ kJ/kg, metanın standart basınç ve sıcaklıkta (1013 mbar – 0 $^{\circ}\text{C}$) alt ısı değeri, $H_{a,m} = 50$ MJ/kg, yoğunluğu, $\rho_1 = 0,72$ kg/m³ olarak alınmıştır. Şekil 2.15'deki, biyogaz içerisinde bulunan su buharının bağıl nem ve sıcaklığa bağlı olarak kısmi basınç değişimi grafiği ve (2.9) nolu denklem kullanılarak düzeltilmiş basınç p_d ,

$$p_d = 1043 - 70 = 973 \text{ mbar olarak bulunur.}$$

Düzeltilmiş basınç (2.7) formülünde yerine konularak düzeltilmiş yoğunluk ρ_2 ,

$$\rho_2 = 0,72 \cdot \frac{273}{310} \cdot \frac{973}{1013} = 0,61 \text{ kg/m}^3 \text{ olarak elde edilir.}$$

Düzeltilmiş yoğunluk değeri (2.8) formülünde yerine konularak, kullanılan biyogazın alt ısı değeri $H_{a,n}$,

$H_{a,n} = 0,57 \cdot 0,61 \cdot 50 = 17,38 \text{ MJ/m}^3 = 17380 \text{ kJ/m}^3$ olarak bulunur.

Denemelerden elde edilen değerler (3.3) no'lu verim denkleminde yerine konularak, her yakıcı ve ısıtma sıcaklığına göre elde edilen ocak verim değerleri η_o , Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Denemeler sonucunda elde edilen ocak verim değerleri

Yakıcı Numarası ve Deneme Sıcaklığı	Ocak Verimi η_o
I. Yakıcı 60 °C	0,63
I. Yakıcı 80 °C	0,66
II. Yakıcı 60 °C	0,56
II. Yakıcı 80 °C	-
III. Yakıcı 60 °C	0,66
III. Yakıcı 80 °C	0,66

I. yakıcı 8 cm çapında 38 delikli, II. yakıcı 4 cm çapında 18 delikli ve III. yakıcı 6,5 cm çapında 31 deliklidir. En küçük boyuttaki II. yakıcıda 80 °C'ye ulaşamadığı için, bu sıcaklıkta deneme tamamlanamamıştır. Çizelge 4.2'de gösterilen verim değerleri, biyogazla çalışan ocaklar için verilen değer aralığında yer almaktadır (Kishore vd., 1987; Werner vd., 1989; Bhattacharya ve Salam, 2002).

İkinci denemede, 4 zamanlı içten yanmalı motora sahip, biyogazla çalışması için modifiye edilmiş, 2,2 kW gücünde benzinli bir jeneratör kullanılmıştır. Jeneratör 1 saat boyunca 0,8 kW güçle yüklenmiştir. Deneme süresince biyogaz tüketimi $V_B = 0,752 \text{ m}^3$ olmuştur. Denemede kullanılan biyogazın özellikleri, ocak veriminin hesaplanmasında kullanılanla aynıdır. Bu değerler formül (3.1)'de yerine konulduğunda, özgül yakıt tüketimi SFC_B ,

$$SFC_B = \frac{0,752}{0,8 \cdot 1} = 0,94 \text{ m}^3/\text{kWh} \text{ olarak bulunur.}$$

Bu değer ve kullanılan biyogazın alt ısı değeri olan 17380 kJ/m^3 ($4,828 \text{ kWh/m}^3$) değeri formül (3.2)'de yerine konduğunda, elektrik çevrim verimi η_e ,

$$\eta_e = \frac{1}{0,94 \cdot 4,828} = 0,22 \text{ (\% 22) olarak elde edilir. Bu değer,}$$

küçük güçteki jeneratörler için literatürde verilen değerlerle uyum içerisindedir (Tafdrup, 1995; Lusk, 1998; Anon., 1999a; Anon., 1999c).

4.6 Optimum İzolasyon Kalınlıklarının Belirlenmesi

Bölüm 3.2 de belirtilen yöntem kullanılarak, İzmir ili için 5 m^3 kapasiteli bir biyogaz reaktörünün optimum izolasyon kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. İzolasyon kalınlığının hesaplanmasında kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Reaktör, 2 m çapında, 2 m yüksekliğinde 5 m^3 çalışma hacminde dik tip silindirik olarak seçilmiştir. Besleme materyali olarak % 8 katı madde oranına sahip, sulandırılmış sığır atığı göz önüne alınmıştır. Günlük biyogaz

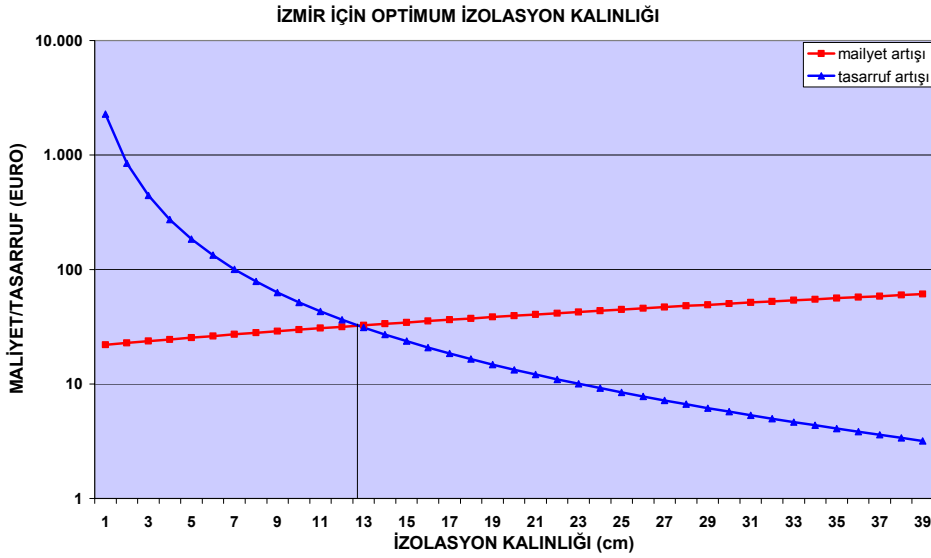
üretim verimi 1,2 m³-biyogaz/ m³-reaktör gün olarak hesaplara dahil edilmiştir.

Çizelge 4.3

Hesaplamalarda kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
$\lambda_{izolasyon}$	0,04 W/m°C
$\lambda_{reaktör (ST-37)}$	60 W/m °C
$\lambda_{reaktör(Fiberglass)}$	0,4W/m °C
$T_{reaktör}$	37 °C
$\alpha_{iç}$	150 W/m ² °C
$\alpha_{dış}$	20 W/m ² °C
$l_{reaktör}$	0,005 m
% CH ₄	% 65
P (LPG-Dökme)	3,26x10 ⁻⁸ €/J
i	%10
C_{by} (Taş Yünü)	103 €/m ³
N	10 yıl

İzolasyon kalınlığının her 1 cm artışıyla gerçekleşen, tasarruflardaki ve maliyetlerdeki artış, Şekil 4.6.1’de grafik olarak gösterilmiştir. Hem çelik hem de fiberglass reaktör malzemesi için, aynı değerler bulunmuştur. Bu iki eğrinin kesiştiği nokta, bize optimum izolasyon kalınlığını vermektedir. I. İklim Bölgesinde bulunan İzmir ili için belirlenen optimum izolasyon kalınlığı Şekil 4.36’de görüldüğü gibi 13 cm olmaktadır.



Şekil 4.36 İzmir için 5 m³ reaktörün optimum izolasyon kalınlığı

4.7 Güneş Enerjisi Sistem Büyüklüklerinin Belirlenmesi

Elde edilen optimum izolasyon kalınlığıyla oluşturulan 5 m³ kapasiteli biyogaz sisteminin, ısıl enerji modelinde yerine konması sonucu, İzmir ili için güneş kollektörü sayısı ve sıcak su akümülayon tankı hacminin optimum kombinasyonu belirlenmiştir.

İzmir için elde edilen sistem büyüklüğü Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.4 İzmir için elde edilen optimum güneş enerjisi sistemi büyüklüğü

İZMİR İLİ
10 YIL İÇİN KARLILIK TABLOSU (EURO)

BOYLER HACMI (lt)	200 lt	350 lt	600 lt	750 lt	1000 lt
KOLLEKTÖR SAYISI(ADET)					
1 ADET	-209	-293	-441	-565	-873
2 ADET	-30	-112	-243	-370	-675
3 ADET	37	-9	-140	-264	-568
4 ADET	40	43	-79	-197	-496
5 ADET	14	57	-60	-174	-475
6 ADET	-34	47	-70	-184	-486
7 ADET	-94	19	-99	-211	-512
8 ADET	-161	-23	-140	-250	-549
9 ADET	-230	-74	-185	-293	-591
10 ADET	-302	-132	-241	-344	-639

Dikkat edilecek olursa, I. İklim Bölgesinde bulunan İzmir için sistem karlılık miktarı oldukça düşüktür. Seçilen kolektör sayısı 5 adetde kalmaktadır. Kullanılmayan güneş enerjisinin depolanmasını sağlayan sıcak su akümülayon tankının hacmi ise, 350 lt olarak bulunmuştur. Bunun nedeni bu iklim bölgesinde, reaktörün ısı ihtiyacının nispeten düşük olmasıdır.

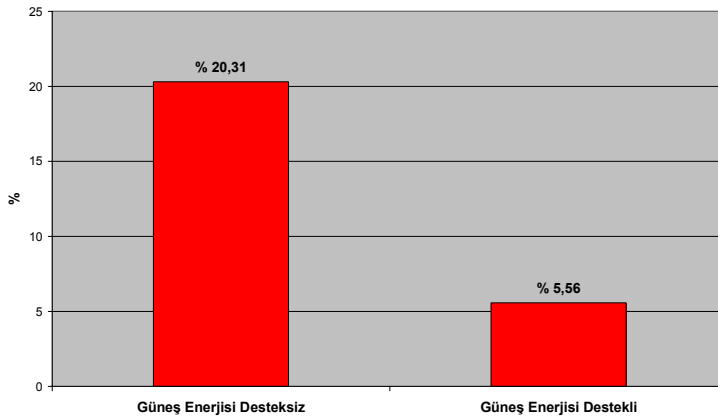
Bu büyüklüklere sahip güneş enerjisi desteğinin kullanılması durumunda,

Reaktörün Toplam Isı Kaybı = 12,01 GJ/yıl

Güneş Enerjisi Tarafından Karşılanan = 8,72 GJ/yıl

Ek Isıtma İhtiyacı = 3,29 GJ/yıl olarak bulunur.

Bulunan bu değerlerle oluşturulan, güneş enerjisi desteğinin kullanılması ve kullanılmaması durumuna göre, yıllık olarak üretilen biyogazın, reaktör ısıtmasına harcanma oranı, Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



Şekil 4.37 Yıllık olarak üretilen biyogazın reaktör ısıtmasına harcanma oranı

Şekil 4.37’den de görüleceği gibi, sisteme güneş enerjisi desteği eklendiğinde, bir yılda üretilen biyogazın yaklaşık olarak % 15’i tasarruf edilebilmektedir.

4.8 Farklı İllere Göre Reaktör Boyutlarının Hesaplanması

Her üç iklim bölgesinden seçilen iki il için yapılan hesaplamalarda, 100 m² oturma alanı olan bir eve sahip, 4 kişiden oluşan bir ailenin enerji gereksinimlerinin biyogaz ile sağlanması araştırılmıştır. Tüm sistemlerde, besleme materyali olarak, % 10 TK oranına sahip, su+sığır atığı karışımı göz önüne alınmıştır. Biyogazın, enerji gereksinimlerini karşılamasında, sırasıyla, reaktör ısıtması, pişirme, sıcak su hazırlama ve ısınma şeklinde

öncelikler belirlenmiştir. Bu gereksinimleri karşılayan minimum reaktör boyutu her il için seçilmiştir. Reaktörde kullanılan izolasyon malzemesi, ısı iletim katsayısı $0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ olan taş yünüdür. İzolasyon kalınlıkları, her il ve reaktör boyutu için, bölüm 4.3’de verilen yöntem kullanılarak, mezofilik bölgedeki çalışma sıcaklığı (37°C) ve termofilik bölgedeki çalışma sıcaklığı (55°C) koşullarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Mezofilik bölgede çalışan reaktörlerin, hesaplanan optimum izolasyon kalınlıkları, çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Mezofilik bölgede (37°C) çalışan reaktörlerin optimum izolasyon kalınlıkları

		İzolasyon Kalınlıkları (cm)				
Reaktör Hacmi(m^3)	ANTALYA	İZMİR	DİYARBAKIR	SAMSUN	ANKARA	ERZURUM
0,3	10	10	10	11	11	12
0,5	10	10	11	11	12	13
0,75	11	11	11	12	12	13
1	11	11	12	12	13	14
2	12	12	13	13	13	15
3	12	12	13	13	14	15
4	12	13	13	14	14	16
5	13	13	14	14	14	16
6	13	13	14	14	15	16
7	13	13	14	14	15	16
8	13	13	14	14	15	17
9	13	14	14	14	15	17
10	13	14	14	15	15	17
15	14	14	15	15	15	17
20	14	14	15	15	16	18
30	14	14	15	15	16	18
40	14	15	15	16	16	18
50	14	15	15	16	16	19
60	14	15	16	16	17	19
70	14	15	16	16	17	19
80	15	15	16	16	17	19
90	15	15	16	16	17	19
100	15	15	16	16	17	19

Optimum izolasyon kalınlıkları, termofilik bölgede (55 °C) çalışan reaktörler için, Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Termofilik bölgede (55 °C) çalışan reaktörlerin optimum izolasyon kalınlıkları

İzolasyon Kalınlıkları (cm)						
Reaktör Hacmi(m ³)	ANTALYA	İZMİR	DİYARBAKIR	SAMSUN	ANKARA	ERZURUM
0,3	12	12	13	13	13	14
0,5	13	13	14	14	14	15
0,75	14	14	14	15	15	16
1	14	14	15	15	15	16
2	15	15	16	16	16	17
3	16	16	17	17	17	18
4	16	17	17	17	18	19
5	17	17	17	17	18	19
6	17	17	18	18	18	19
7	17	17	18	18	18	20
8	17	18	18	18	19	20
9	18	18	18	18	19	20
10	18	18	18	19	19	20
15	18	18	19	19	20	21
20	19	19	19	19	20	21
30	19	19	19	20	20	22
40	19	20	20	20	21	22
50	19	20	20	20	21	22
60	20	20	20	21	21	23
70	20	20	21	21	21	23
80	20	20	21	21	22	23
90	20	20	21	21	22	23
100	20	20	21	21	22	23

Reaktörlerin yapım malzemesi olarak, St-37 yumuşak çelik alınmıştır. İzolasyonun üzeri, alüminyum sac ile kapatılmış olarak kabul edilmiştir. Modelde kullanılan reaktörlerin boyutları ve sac kalınlıkları, çizelge 4.7'de görülmektedir.

Çizelge 4.7 Reaktörlerin boyutları ve sac kalınlıkları

Reaktör Hacmi (lt)	Sac Kalınlığı (mm)	Yarıçap (m)	Yükseklik (m)
0,3	3	0,31	1
0,5	3	0,4	1
0,75	4	0,45	1,2
1	4	0,52	1,2
2	4	0,65	1,5
3	5	0,75	1,7
4	5	0,82	1,9
5	5	0,89	2
6	6	0,93	2,2
7	6	0,98	2,3
8	6	1,05	2,3
9	7	1,1	2,37
10	7	1,13	2,5
15	7	1,26	3
20	8	1,41	3,2
30	8	1,65	3,5
40	8	1,8	3,9
50	9	1,94	4,2
60	9	2,08	4,4
70	9	2,2	4,6
80	9	2,3	4,8
90	10	2,4	5
100	10	2,47	5,2

Kurulan modelde, mezofilik bölgede çalışan reaktörler için biyogaz üretim verimi, $1,2 \text{ m}^3\text{-biyogaz/m}^3\text{-reaktör.gün}$, termofilik bölgede çalışan reaktörler içinse $2 \text{ m}^3\text{-biyogaz/m}^3\text{-reaktör.gün}$ olarak alınmıştır. Elde edilen biyogazın ısı değeri, 27 MJ/m^3 olarak hesaplara dahil edilmiştir. Bölüm 4.3’de verilen yöntem kullanılarak elde edilen bulgular Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.10’da özetlenmiştir. Çizelge 4.8’de verilen değerler, mezofilik bölgede çalışan biyogaz sistemlerini içermektedir. Termofilik bölgede çalışan sistemlerle ilgili bulgular ise çizelge 4.10’da özetlenmiştir.

Çizelge 4.8 Mezofilik bölge sıcaklığı (37 °C) için, çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılayan minimum reaktör hacimleri ve bu ihtiyaçların karşılanmasından sonra artan biyogaz miktarları

Enerji İhtiyacı	Enerji İhtiyaçlarını Karşılayan Minimum Reaktör Hacimleri (m ³)					
	Antalya	İzmir	Diyarbakır	Samsun	Ankara	Erzurum
Reaktör Isıtma	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,75
Piştirme	2	2	2	2	2	2
Sıcak Su Hazırlama	3	4	4	4	4	5
Isıtma	20	30	30	30	40	60
Artan Biyogaz (m ³)	4530	7985	6079	6283	8403	12166

Çizelge 4.8’den görüldüğü gibi, Antalya, İzmir ve Samsun illerinde 0,3 m³ hacimli biyogaz reaktörleri kendi ısı ihtiyaçlarını karşılamakta, Diyarbakır ve Ankara için bu hacim 0,5 m³’ye çıkmaktadır. Sert iklim yapısına sahip Erzurum’da ise ancak 0,75 m³ hacime sahip biyogaz reaktörleri, sıcaklığın 37 °C’de kalmasını sağlayabilmektedir. 2 m³ hacimli biyogaz reaktörleri, her il için, reaktör ısıtması yanında, piştirme amaçlı kullanımı da karşılamaktadır. Bu ihtiyaçların yanında, sıcak su ihtiyacını da karşılayan reaktör hacimleri, 3–5 m³ arasında değişmektedir. İncelememize konu olan enerji ihtiyacının tümünü karşılayabilecek reaktör hacmi Antalya’da 20 m³ olurken, Erzurum’da bu değer 60 m³’e çıkmaktadır. Bu da, Erzurum’da evsel enerji ihtiyacının tümünü biyogazla karşılamak isteyen bir ailenin, yaklaşık 70–90 büyükbaş hayvana sahip olması gerektiğini göstermektedir. Antalya’da ise bu sayı 25-30’a kadar düşmektedir.

Yıllık evsel enerji ihtiyacının tümü karşılandıktan sonra, özellikle ısıtma enerjisi ihtiyacının minimum olduğu yaz aylarında, geriye

kullanılmamış biyogaz kalmaktadır. Her il için kalan miktarlar Çizelge 4.9’da görülmektedir. Artan bu biyogaz, gıda kurutma, absorpsiyonlu soğutma ve elektrik eldesi gibi amaçlarla kullanılabilir. Isı enerjisi ve elektrik enerjisi eldesi amaçlı kullanımla ilgili bulgular, her il için Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 İller bazında, yıllık artan biyogazın, farklı enerji eldesi amaçlı kullanımları

İller	Artan Biyogaz (m ³)	Isı Enerjisi (kJ)	12 kg LPG Tüp Karşılığı (adet)	Elektrik Enerjisi (kWh)
Antalya	4.530	208.488.720	223	7.874
İzmir	7.985	367.501.640	393	13.880
Diyarbakır	6.079	279.779.896	299	10.567
Samsun	6.283	289.168.792	309	10.922
Ankara	8.403	386.739.672	413	14.607
Erzurum	12.166	559.927.984	599	21.149

Hesaplamalarda, jeneratörün elektrik çevrim verimi % 23, LPG’nin ısı değeri 46024 kJ/kg olarak alınmıştır.

Termofilik bölgede (55 °C) çalışan reaktörlerin, her il için enerji ihtiyaçlarını karşılayan büyüklükleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Termofilik bölge sıcaklığı (55 °C) için, çeşitli enerji ihtiyaçlarını karşılayan minimum reaktör hacimleri ve bu ihtiyaçların karşılanmasından sonra artan biyogaz miktarları

Enerji İhtiyacı	Enerji İhtiyaçlarını Karşıllayan Minimum Reaktör Hacimleri (m ³)					
	Antalya	İzmir	Diyarbakır	Samsun	Ankara	Erzurum
Reaktör Isıtma	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
Piştirme	1	2	2	2	2	2
Sıcak Su Hazırlama	3	3	3	3	3	4
Isıtma	15	20	30	20	30	40
Artan Biyogaz (m ³)	4632	6959	9462	5181	8368	9945

Çizelge 4.10'dan görüleceği gibi, reaktör sıcaklığını sürekli 55 °C'de tutabilmek için gereken minimum reaktör hacmi Erzurum için 0,5 m³ olmakta, diğer illerde bu büyüklük 0,3 m³'e gerilemektedir. Mutfak kullanımı da eklendiğinde, Antalya'da 1 m³, diğer illerde 2 m³ hacimli reaktörler ihtiyacı karşılamaktadır. Bu ihtiyaçlara, sıcak su tüketimi de eklendiğinde, Erzurum'da 4 m³, diğer illerde 3 m³ hacimli reaktörler yeterli olmaktadır. Evsel enerji ihtiyacının tümünü karşılayan reaktör hacimleri, termofilik bölgede, mezofilik bölgeye göre, Antalya için 15 m³'e, Erzurum için ise 40 m³'e gerilemektedir. Fakat gerekli büyükbaş hayvan sayılarına baktığımızda, mezofilik bölgeye göre bu rakam Antalya için 30–40, Erzurum için 90-100'e yükselmektedir. Bunun nedeni, mezofilik bölgede bekletme süresi 20 gün olurken, termofilik bölgede bu değer 12 gün olmasıdır. Bu da, reaktörün günlük besleme ihtiyacını artırmaktadır.

Termofilik bölgede çalışan reaktörler için artan biyogaz miktarları ve enerji karşılıkları, her il için Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Termofilik reaktörler için, iller bazında, yıllık artan biyogazın, farklı enerji eldesi amaçlı kullanımları

İller	Artan Biyogaz (m ³)	Isı Enerjisi (kJ)	12 kg LPG Tüp Karşılığı (adet)	Elektrik Enerjisi (kWh)
Antalya	4.632	213.183.168	228	8.052
İzmir	6.959	320.281.016	342	12.097
Diyarbakır	9.462	435.479.088	465	16.448
Samsun	5.181	238.450.344	255	9.006
Ankara	8.368	385.128.832	412	14.546
Erzurum	9.945	457.708.680	489	17.288

Çizelge 4.11'e dikkat edilecek olursa, mezofilik bölgede çalışan reaktörlere göre, termofilik reaktörlerin getirisinin, Antalya ve Diyarbakır dışında daha düşük gerçekleştiği görülecektir. Diyarbakır'da da, mezofilik reaktör için gerekli büyükbaş hayvan sayısı 35–45 olurken, termofilik reaktör için bu sayının 60-75'e çıktığı göz ardı edilmemelidir. Elde edilen sonuçlar, mezofilik bölgede çalışan biyogaz sistemlerinin, termofiliklere göre daha fazla tercih edilmesini açıklar niteliktedir (Jenangi, 1981; Monnet, 2003).

4.9 Biyogaz Sistemlerine Ekonomik Yaklaşım

Bu bölümde, 5 m³ hacimli reaktör ve gazometreye sahip, çiftlik tipi biyogaz sisteminin, İzmir ili iklim şartlarında fizibilite çalışması, hem epoksi kaplı ST-37 malzeme, hem de fiberglass malzeme kullanımına göre, ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sistemlerin yıllık ısı enerji ihtiyacı, Bölüm 4.6'da oluşturulan model yardımıyla, 2002–2003 yılına ait, günlük iklim verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalarda göz önüne alınan sisteme ait parametreler ve fizibilite çalışmasında yapılan kabuller, Çizelge 4.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.12

Hesaplamalarda kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
$V_{reaktör}$	5 m ³
$\lambda_{izolasyon}$	0,04 W/m °C
$\lambda_{reaktör (ST-37)}$	60 W/m °C
$\lambda_{reaktör(Fiberglass)}$	0,4W/m °C
$T_{reaktör}$	37 °C
$\alpha_{iç}$	150 W/m ² °C
$\alpha_{dış}$	20 W/m ² °C
$l_{reaktör}$	0,005 m
$l_{izolasyon}$	0,13 m
$\eta_{reaktör}$	1,2 m ³ -B./m ³ -R.
$TK_{besleme}$	% 10
$TK_{fermente}$	% 6
$H_{a,n}$	27 MJ/N m ³
$P_{fermente}$ (Kuru)	0,33 €/kg
P_y (LPG-Tüp)	3,72x10 ⁻⁸ €/J
P_{hurda}	% 25 I_0
$P_{işletme}$	% 5 I_0
i	% 10
C_{by} (Taş Yünü)	103 €/m ³
n	15 yıl

Metal reaktör ve gazometre için yatırım maliyeti, sistemi oluşturan parçalar bazında, piyasa fiyatları göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Bu maliyetler şu şekildedir;

1- Reaktör	: 4.000,00 YTL
2- Gazometre	: 4.500,00 YTL
3- Karıştırma ve besleme pompası	: 2.500,00 YTL
4- Yalıtım ve tesisat	: 1.250,00 YTL
5- Hazırlama ve boşaltma üniteleri	: 1.000,00 YTL
6- Otomasyon	: 600,00 YTL
7- <u>İşçilik ve nakliye</u>	: 1.000,00 YTL
TOPLAM	: 14.850,00 YTL

1 EURO=1,8 YTL kur dönüşümü baz alındığında, ilk yatırım maliyeti, $I_0 = 14.850,00 = 8.250$ EURO olarak bulunmuştur. Yıllık işletme ve bakım giderleri, ilk yatırımın % 5'i, 15. yılda hurda değeri, ilk yatırımın % 25'i olarak kabul edilmiştir (Kocar ve Eryasar, 2005).

Sistemin ısıtma ihtiyacı, model yardımıyla bulunmuştur ve üretilen yıllık biyogazın % 16,7'sine karşılık gelmektedir. Buna göre, biyogazdan elde edilen yıllık toplam kazanç $N_p=1997$ EURO olarak gerçekleşmektedir. Yıllık olarak elde edilen fermente gübrenin miktarı, TK oranı % 6 olarak alındığında, kuru bazda 5475 kg olmaktadır. Buna göre, gübre kullanımı yönünden yıllık getiri $N_f=1806$ EURO olarak bulunmuştur. Bu kazançları ve işletme giderlerini de göz önüne aldığımızda, biyogaz sisteminin yıllık getirisi $N_T=3390$ EURO olarak elde edilir. Son yıldaki hurda değerini de hesaplara dahil ederek, işletme ömrü boyunca elde edilen yıllık getirinin bu günkü karşılığını (NPV) bulmak için, Formül (2.15)'i kullandığımızda,

$$NPV = 3390 \cdot \frac{(1+0,1)^{15} - 1}{(1+0,1)^{15} \cdot 0,1} + 494 = 26.278 \text{ EURO}$$

sonucuna ulaşılmaktadır. $NPV > I_0$ olduğu için, söz konusu biyogaz sistemi, ekonomik olarak uygulanabilir çıkmaktadır. Aynı formüller kullanılarak, sistemin kendini geri ödeme süresinin, 2,25 yıl olarak gerçekleştiği görülmektedir.

Reaktör ve Gazometre malzemesinin fiberglass olması durumunda, ilk yatırım maliyeti I_0 , şu kalemlerden oluşmaktadır;

1- Reaktör	: 3.000,00 YTL
2- Gazometre	: 3.500,00 YTL
3- Karıştırma ve besleme pompası	: 2.500,00 YTL
4- Tesisat	: 500,00 YTL
5- Hazırlama ve boşaltma üniteleri	: 1.000,00 YTL
6- Otomasyon	: 600,00 YTL
7- İşçilik ve nakliye	: 1.000,00 YTL
TOPLAM	: 12.100,00 YTL

Böylece, $I_0=6.722$ EURO olarak elde edilir. Biyogazdan ve fermente gübreden elde edilen yıllık toplam kazanç, metal reaktörle aynıdır. Yıllık işletme ve bakım giderleri göz önüne alındığında, biyogaz sisteminin yıllık net getirisi $N_T=3.467$ EURO olarak bulunur. Metal reaktörün fizibilite çalışmasında uygulanan yöntemle, biyogaz sisteminin işletme süresi boyunca oluşturacağı getirilerin bugünkü değeri $NPV=26.772$ EURO, geri ödeme süresi 1,74 yıl olarak hesaplanır. Fiberglass malzemenin kullanıldığı biyogaz sistemi, metal kullanılına göre, ekonomik olarak daha uygulanabilir çıkmaktadır.

Burada bulunan ve ekonomik yönden oldukça çekici olan geri ödeme süreleri, ideal şartlar altında belirlenmiştir. Referans yakıt olarak alınan tüp LPG, oldukça pahalı bir yakıttır. Ayrıca elde edilen biyogazın

ve fermente gübrenin tamamının kullanıldığı varsayımı üzerine hesaplamalar yapılmıştır. Kırsal kesim insanının, ısı enerjisi ihtiyacınının yarısını, neredeyse bedelsiz olarak elde ettiği orman ve bitki atıklarından sağladığı, üretilen fermente gübrenin en fazla yarısını değere dönüştürebildiği, hurda değerinin ise ilk yatırımın % 10'u seviyesinde gerçekleşeceği varsayılırsa, metal sistem için geri ödeme süresi 7,9 yıl, fiberglass sistem için 5,4 yıl olarak bulunmaktadır. Biyogaz sistemlerinin, parayla ifade edilemeyen sosyal ve çevresel faydaları da göz önüne alındığında, ulaşılan sonuçlar, bu sistemlerin çekiciliğini artırmaktadır.

Bu bölümde ayrıca, Tarım ve Köyişleri Bakanlığına bağlı Koruma ve Kontrol Genel Müdürlüğünün oluşturduğu, Veteriner Bilgi Sistemi-Türkvat'ten, İzmir ili için güncel büyükbaş hayvan sayısı ve haneler bazında dağılımı ile ilgili alınan bilgiler, biyogaz sistemlerinin potansiyeli yönünden analiz edilmiştir. Elde edilen hane başına hayvan sayılarına göre oluşturulabilecek biyogaz sistemleri, her ilçe için tespit edilmiştir. Biyogaz sistemlerinin mezofilik koşullarda çalıştığı varsayılmış ve bölüm 4.8'de elde edilen bulgular göz önüne alınarak, en küçük reaktör hacmi 2 m³ olarak seçilmiştir. Bu nedenle, 3 büyükbaş hayvan sayısından daha az hayvana sahip haneler, analize dahil edilmemiştir. İlçeler bazında elde edilen sistem büyüklükleri, Çizelge 4.13'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.13 Potansiyel biyogaz sistemlerinin İlçeler bazında sayıları

	Reaktör Boyutları					
	2–5 m ³	5–25 m ³	25–50 m ³	50–100 m ³	100–500 m ³	500m ³ <
Aliğa	411	195	17	5	-	-
Balçova	17	6	-	-	1	-
Bayındır	1132	1329	207	75	21	-
Bergama	2805	1973	110	20	6	1
Beydağ	690	420	31	7	-	-
Bornova	94	111	15	2	2	-
Buca	154	143	15	8	2	-
Çeşme	51	30	9	2	-	-
Çiğli	29	36	12	1	-	-
Dikili	370	209	22	8	2	-
Foça	133	147	28	14	6	-
Gazimir	11	9	-	-	-	-
Güzelbahçe	14	7	-	-	-	1
Karaburun	31	20	2	1	-	-
Karşıyaka	59	23	5	1	-	-
Kemalpaşa	484	402	106	50	29	3
Kınık	767	337	13	5	1	-
Kiraz	2442	1362	99	18	5	-
Konak	7	3	-	-	-	-
Menderes	814	556	59	6	5	-
Menemen	551	501	74	24	13	-
Merkez	42	25	4	-	1	-
Ödemiş	3828	3139	518	200	87	-
Seferihisar	149	140	17	4	2	-
Selçuk	147	143	15	5	2	-
Tire	1833	1414	257	83	37	1
Torbalı	602	435	64	42	15	2
Urla	209	125	23	7	2	-
TOPLAM	17876	13240	1722	588	239	8

Çizelge 4.13'den görüleceği gibi, 31.116 adetle en fazla potansiyele sahip sistemler, küçük ölçekli diyebileceğimiz 2–25 m³ arasında reaktör hacmine sahip sistemlerdir. Biyogaz sistemlerinin yaygınlaştırılmasında, bu boyutlardaki sistemlere öncelik verilmesi bu nedenle daha önemli görülmektedir. Köy bazında merkezi sistemlerin

kurulması mümkündür. Ancak, özellikle atıkların toplanmasında karşılaşılabilecek sorunlar, bu tip merkezi sistemlerin önündeki en büyük engeldir. Potansiyel biyogaz sistemlerinden elde edilebilecek biyogaz ve fermente gübre miktarları, yine ilçeler bazında Çizelge 4.14’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 İlçeler bazında potansiyel biyogaz sistemlerinden elde edilebilecek yıllık biyogaz ve fermente gübre miktarları ve parasal getirileri

	Biyogaz (m³)	Biyogazın Getirisi (YTL)	Fermente Gübre (ton)	Fermente Güb. Getirisi (YTL)
Aliağa	1.794.398	3.534.068	4.486	2.664.682
Balçova	108.799	214.280	272	161.567
Bayındır	15.417.635	30.365.032	38.544	22.895.188
Bergama	15.904.236	31.323.392	39.761	23.617.790
Beydağ	3.613.710	7.117.202	9.034	5.366.360
Bornova	1.121.420	2.208.637	2.804	1.665.309
Buca	1.571.439	3.094.949	3.929	2.333.587
Çeşme	383.793	755.881	959	569.933
Çiğli	457.272	900.597	1.143	679.049
Dikili	2.247.886	4.427.212	5.620	3.338.111
Foça	2.208.151	4.348.953	5.520	3.279.104
Gaziemir	45.412	89.439	114	67.437
Güzelbahçe	320.406	631.039	801	475.803
Karaburun	194.892	383.841	487	289.415
Karşıyaka	285.716	562.718	714	424.288
Kemalpaşa	9.770.799	19.243.588	24.427	14.509.636
Kınık	2.972.268	5.853.882	7.431	4.413.818
Kiraz	11.991.879	23.618.006	29.980	17.807.941
Konak	22.391	44.098	56	33.250
Menderes	5.130.592	10.104.701	12.826	7.618.929
Menemen	6.018.646	11.853.723	15.047	8.937.689
Merkez	366.133	721.099	915	543.707
Ödemiş	41.847.326	82.418.308	104.618	62.143.279
Seferihisar	1.438.672	2.833.465	3.597	2.136.428
Selçuk	1.395.468	2.748.374	3.489	2.072.270
Tire	18.543.799	36.522.012	46.359	27.537.541
Torbalı	8.928.157	17.584.005	22.320	13.258.313
Urla	1.620.004	3.190.599	4.050	2.405.706
TOPLAM	155.721.299	306.693.098	389.303	231.246.129

İzmir ili genelinde, bir yılda elde edilebilecek biyogaz miktarı, 156 Milyon m³, bu miktar biyogazın enerji karşılığı ise 100 BTEP civarında olmaktadır. Elde edilebilecek organik gübre miktarı ise, kuru bazda, yaklaşık 390 Bin ton'dur. Çizelge 4.14'den de görüleceği gibi, potansiyel biyogaz sistemlerinin yıllık getirisi, yaklaşık 538 Milyon YTL'dir ki bu rakamların içinde, çevre ve sağlıkla ilgili getiriler ile sosyal faydalar bulunmamaktadır.

4.10 Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmalarının doğruluğunun kanıtlanması için, belirsizlik analizine ihtiyaç vardır (Hepbaslı ve Balta, 2007). Yapılan deneylerde, ölçüm cihazlarından, cihaz kalibrasyonundan, ortamdan, okumadan ve deneyin planlamasından kaynaklanan hatalar ve belirsizlikler meydana gelmektedir (Doğru vd., 2002). Bu çalışmada, sıcaklık, basınç, gaz debisi, gaz içeriği ve pH ölçümleri yapılmıştır. Çizelge 4.15'de, bu ölçümlerden kaynaklanan hataların miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.15 Ölçümlerden kaynaklanan belirsizlikler

Tanım	Ortalama değeri	Birimi	Toplam Belirsizlik
Biyogaz Debisi (Hac.)	0,250	m ³ /gün	% ±3,01
CH ₄ Oranı	55	%	% ±1,20
CO ₂ Oranı	50	%	% ±3,00
O ₂ Oranı	20	%	% ±0,50
H ₂ S Miktarı	200	ppm	% ±5,00
Ortam Sıcaklığı	23	°C	% ±1,59
Reaktör Sıcaklığı	37	°C	% ±1,59
Biyogaz Basıncı	150	mbar	% ±3,30
Ortamın pH Değeri	7,6	pH	% ±0,01

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, pilot ölçekli biyogaz sistemlerinde çeşitli denemeler gerçekleştirilmiştir. Denemeler, güneş enerjisi destekli, 280 lt hacimli sistemde, mezofilik-kesikli, mezofilik-sürekli ve termofilik-sürekli olmak üzere üç bölümde incelenmiştir.

Mezofilik bölgedeki kesikli denemede, 37 °C çalışma sıcaklığında, sığır atığının anaerobik fermentasyonu için 20 gün bekletme süresinin uygun olduğu görülmüştür. Deneme süresince üretilen toplam 10,826 m³ biyogazın, 7,601 m³'ü, yani toplamın % 70'i ilk 20 gün içinde üretilmiştir. Üretilen biyogazın metan içeriği, sığır atığı için verilen aralık içerisinde kalarak, ortalama % 55 olarak gerçekleşmiştir. Bulgulardan görüldüğü gibi, pH değerinde önemli değişimler yaşanmamış, hafif bazik seviyede fermentasyon devam etmiştir. pH değerinin kontrolüne ihtiyaç duyulmaması, kırsal kesime yönelik biyogaz sistemlerinde sığır atığının kullanımını çekici hale getirmektedir.

Mezofilik bölgedeki sürekli beslemenin yapıldığı denemede, durdurulan sistemin, besleme başlatıldığında hemen biyogaz üretimine geçmesi dikkat çekicidir. Biyogaz sistemlerinin, herhangi bir nedenle durdurulması halinde, tekrar başlatılmasının sorun olmadığını gösteren bu durum, önemli bir avantajdır. Denemede, 1,2 m³-biyogaz/m³-reaktör.gün verim seviyesine ulaşılmıştır. Bu verim değeri, daha önce ülkemizde uygulanmaya çalışılan Çin-Hint tipi reaktörlerin verim değerinin (0,3–0,6) yaklaşık iki katıdır.

Reaktör sıcaklığının ani olarak 55 °C'ye yükseltildiği termofilik bölgedeki denemede, sıcaklık yükselmesiyle sistemin düzensizleştiği, fakat 10 gün gibi kısa bir sürede toparlanarak, biyogaz üretiminin tekrar

başladığı görülmüştür. Bu bulgu, biyogaz sistemlerinin, üretim kaybı yüksek olmadan, gerektiğinde farklı sıcaklıklarda çalıştırılabileceğini göstermektedir. Güneş enerjisi destekli reaktörlerde, sistem dizaynı kış şartlarını karşılayacak şekilde yapıldığında, özellikle ışıyım şiddetinin yüksek, ısı kaybının düşük olduğu yaz döneminde, güneşten kazanılan enerjinin çok azı kullanılabilmektedir. Diğer bir olgu da, biyogaz üretiminde kullanılabilecek bitkisel atıkların, bu dönemde çoğalmasındır. Bu nedenlerle, kış döneminde, mezofilik bölgede hayvansal atıklarla çalışan güneş enerjisi destekli bir sistem, yaz döneminde bitkisel atıkların da eklenmesiyle termofilik bölgede çalıştırılabilir ve biyogaz verimi yaklaşık 1,7 kat artırılabilir. Böylece güneşten kazanılan enerjinin daha büyük bir kısmı kullanılmış ve sistemin toplam verimi artırılmış olur. Denemede sıcaklık değişiminin etkisinin kısa süreli olması, bu konuda çalışılabileceğini göstermektedir.

Denemelerde, sürekli beslemede yükleme oranlarının, mezofilik bölgede 4,98 kg-UK/m³-reaktör, termofilik bölgede 8,3 kg-UK/m³-reaktör gibi yüksek değerlerde tutulması, giderim veriminin düşmesine neden olmuştur. Reaktör ortamının TK ve UK oranlarının, hem mezofilik hem de termofilik denemelerde yükselmesi, yükleme oranlarının bu değerlerin altında tutulması gerektiğini göstermektedir.

St-37'den farklı olarak, polietilen ve fiberglass malzemeden üretilen 5 m³ kapasiteli reaktörlerle yapılan denemeler, polietilen malzemenin işletim ve onarım aşamalarında sorunlara neden olduğunu göstermiştir. Bu malzemeyle oluşturulan reaktörde, kaçaklar engellenememiş, onarım çalışmaları sonuç vermemiştir. Fiberglassdan yapılan reaktör ve gazometrede de kaçaklarla karşılaşmış, fakat bu kaçakların giderimi mümkün olmuştur. Çeliğe göre hem daha hafif hem daha ekonomik olan fiberglass malzemenin, basınç altında davranışı,

polietilene göre daha istikrarlı olmuştur. Kırsal kesime yönelik biyogaz tesislerinde, ilk yatırım maliyetlerini düşürebilmek için, fiberglass malzemenin reaktör ve gazometrenin imalatında kullanılması uygun görünmektedir.

Dizayn edilerek oluşturulan gazometrenin performans denemeleri, yine bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu gazometre, biyogazla çalışan cihazların gereksinim duyduğu çalışma basıncını, ek bir basınçlandırıcıya ihtiyaç duymadan, suyun yer değiştirme prensibiyle sağlamaktadır. 5 m³ hacimli gazometrede elde edilen 200–300 mbar seviyelerindeki basınç değerleri, biyogazın 100 m'den daha uzak mesafelere, düşük maliyetlerle aktarılabilmesine olanak sağlamaktadır. Hareketli parçalar içermediği için bakım maliyetleri düşüktür. Atmosfere açık olması nedeniyle, basınç yükselmelerine karşı daha güvenlidir. Denemelerde, oluşturulan gazometrenin, biyogazın depolanması ve kullanılması yönünden oldukça uygun olduğu görülmüştür. Bunun yanında, CO₂ ve H₂S'in, CH₄'e göre suda daha fazla çözünmesi nedeniyle, söz konusu gazometrenin, biyogazın arıtımında da kullanılabileceği görülmüştür. Denemelerde, CO₂ giderimi % 25–30, H₂S giderimi ise % 98–100 oranlarında gerçekleşmiştir. CO₂ gideriminin yüksek olması, biyogazın kalitesini artırmakta, aynı zamanda depo hacminin de düşürülmesine imkan sağlamaktadır. H₂S ise, biyogazla çalışan cihazlarda ve aktarım organlarında, korozyona neden olan, istenmeyen bir gazdır. Basitliği, işlevselliği ve emniyetli oluşu, “Biyogaz Tesisleri İçin Gaz Arıtma İşlevli Gazometre” isimli “TR 2006 02900 Y” nolu faydalı model belgesiyle koruma altına alınan bu gazometrenin, kırsal kesim biyogaz sistemlerinde kullanım olanağını artırmaktadır.

Gazometrenin, dolayısıyla reaktörün çalışma basıncının geleneksel biyogaz sistemlerine göre yüksek olmasının, biyogaz üretimi üzerindeki

etkileri, laboratuvar ölçekli denemelerle araştırılmıştır. Alınan sonuçlar, 200 mbar seviyesindeki basınç değerlerinin, biyogaz üretimi üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı yönündedir.

Biyogaz reaktörlerinin ısıtılmasında güneş enerjisinin kullanım imkanları, gerek pilot ölçekli denemeler, gerekse teorik analizler yardımıyla araştırılmıştır. İzmir ili iklim şartlarında, 5 m³ kapasiteli bir biyogaz sisteminde güneş enerjisi kullanımının, reaktörün ısıtılması için bir yılda harcanan biyogaz miktarını, yaklaşık % 15 oranında düşürebileceği yönünde bulgular elde edilmiştir. Güneş enerjisi desteğinin kullanıldığı denemelerde, ısınım şiddetinin yüksek, reaktör ısı ihtiyacının düşük olduğu dönemlerde, sistemde bulunan sıcak su akümülayon tankının sıcaklığının, 90 °C'nin üzerine çıktığı görülmüştür. Bu sıcaklıktaki su, reaktörde bulunan ısı eşanjörüne gönderildiğinde, reaktör sıcaklığında istenmeyen yükselmeler meydana gelmiştir. Sıcaklık kontrolünün bir termostat yardımıyla sağlandığı sistemlerde kaçınılmaz olan bu sıcaklık dalgalanması, sisteme seri olarak bağlanan diğer bir termostat yardımıyla çözülmüştür. Eklenen termostat, reaktörde bulunan ısı eşanjörünün sıcaklığını kontrol etmek için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, söz konusu sıcaklık dalgalanmalarının, karmaşık ve yüksek maliyetli otomasyon sistemleri kullanılmadan çözülebileceğini göstermektedir.

Biyogazın kullanımına yönelik çalışmalarda, piyasada bulunan ve LPG ile çalışan cihazların, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilebileceği görülmüştür. Pişirme, sıcak su hazırlama, ısınma ve elektrik üretimi amaçlarıyla kullanılan bu cihazların, biyogazla çalıştırılmaları durumundaki performansları, çeşitli verimlilik deneyleriyle sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar, LPG ile çalışan cihazların,

önemli bir verim kaybı yaşanmadan kolaylıkla biyogazla çalıştırılabileceği yönündedir.

Deneysel verilerle, günlük bazda iki yılı kapsayan gerçek iklim verilerinin kullanıldığı analizlerde, ülkemiz iklim bölgelerini temsil eden ve büyükbaş hayvan potansiyeli yüksek olan altı ilde, farklı boyutlardaki biyogaz reaktörlerinin evsel enerji ihtiyaçlarını karşılama oranları, hem mezofilik hem de termofilik çalışma sıcaklıklarında incelenmiştir. Ulaşılan sonuçlar, mezofilik reaktörlerin, termofilik reaktörlere göre daha avantajlı olduğu yönündedir. Dört kişilik bir ailenin, biyogazı sadece pişirme amaçlı olarak kullanması durumunda, tüm iller için reaktör boyutlarının, mezofilik şartlarda, en az 2 m³ civarında olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Pişirmenin yanında, sıcak su hazırlama ve ısınma ihtiyacı da karşılanmak istendiğinde, gerekli reaktör hacmi, iklim bölgelerine göre, 20–60 m³ aralığında değişiklik göstermektedir.

İzmir ili iklim şartlarına göre, 5 m³ hacimli, kırsal kesime yönelik biyogaz tesisiyle ilgili gerçekleştirilen fizibilite çalışmasında, reaktör ve gazometre yapımında fiberglass malzeme kullanımının, St-37 kullanımına göre, ilk yatırım maliyetlerini ve yatırımın kendini geri ödeme süresini yaklaşık olarak % 20–30 civarında düşürdüğü görülmüştür. İdeal şartlarda geri ödeme süresi, metal ve fiberglass malzeme kullanımına göre sırasıyla, 2,25 ve 1,74 yıl civarında gerçekleşirken, sistem ürünlerinin % 50'sinin değerlendirilebildiği varsayımıyla, yine sırasıyla 7,9 ve 5,4 yıl civarına yükselmektedir. Geri ödeme süreleriyle ilgili ulaşılan bu sonuçlar, biyogaz sistemlerinin ekonomik olarak uygulanabilir olduğunun bir göstergesidir. İzmir ili için, güncel büyükbaş hayvan sayılarının göz önüne alındığı potansiyel araştırmasının bulguları, kurulabilecek biyogaz tesislerinin, yılda yaklaşık 100 BTEP enerji, 380 Bin ton civarında da organik gübre

sağlayabileceği ve toplam getirisinin yılda 538 Milyon YTL civarında olabileceğini göstermektedir. Bu getiriler ve biyogaz sistemlerinin çevresel, sağlıksal ve sosyal faydaları göz önüne alındığında, kırsal kesim biyogaz sistemlerinin yaygınlaştırılmasının ülkemiz için önemi ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, ekte genel özellikleri verilen, 50 m³ kapasiteli bir biyogaz tesisinin kurulmasıyla uygulamaya akatarılmıştır. Tesis, E.Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü ile ÖR-KOOP (Nazilli ve Çevresi Tarımsal Kalkınma Kooperatifi) arasında yapılan bir protokol dahilinde, Aydın'a bağlı Kuyucak ilçesinin Pamukören beldesinde bulunan, yaklaşık 70 büyükbaş hayvana sahip Ülkü Çiftliğinde kurulmuştur. Teknik özellikleri, çalışma kapsamında oluşturulan pilot ölçekli biyogaz sistemleriyle benzer olan bu tesisden, 60 Nm³/gün biyogaz elde edilmektedir. Tesise, 60 kW gücünde bir kojenerasyon sisteminin entegre edilmesiyle ilgili çalışmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acaroglu, M., Kocar, G., Hepbasli, A.,** 2005, The Potential of Biogas Energy, *Energy Sources*, 27, pp. 251–259
- Ahn, J.-H., Forster, C.F.,** 2002, The Effect of Temperature Variations on the Performance of Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filters Treating a Simulated Papermill Wastewater, *Process Biochemistry*, 37, pp. 589-594
- Ahn, J.H., Do, T.H., Kim, S.D., Hwang, S.,** 2006, The Effect of Calcium on The Anaerobic Digestion Treating Swine Wastewater, *Biochemical Engineering Journal*, 30, pp. 33–38
- Akinbami, J.F.K., Ilori, M.O., Oyeibisi, T.O., Akinwumi, I.O., Adeoti, O.,** 2001, Biogas Energy Use in Nigeria: Current Status, Future Prospects and Policy Implications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, pp. 97-112
- Al-Azzam, S.M.,** 2003, Biogas a Source of Energy, <http://www.jes.org.jo/projects/BioGas/pdfs/s/english.pdf>
- Alexiou, I.E., Kamilaki, A.M.,** 1996, Pre-Treatment of Agro-Industrial Wastewaters, *22nd WEDC Conference*, New Delhi, India
- Alkhamis, T. M., El-Khazali, R., Kablan, M. M., Alhusein, M. A.,** 2000, Heating of a Biogas Reactor Using a Solar Energy System with Temperature Control Unit, *Solar Energy*, Vol. 69, 3, pp. 239-247
- Alvarez, R., Villca, S., Lide'n, G.,** 2006, Biogas Production from Llama and Cow Manure at High Altitude Generation and for Farm Machine Fuel, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 66–75

KAYNAKLAR (devam)

- Alwis, A.D.**, 2002, Biogas - A Review of Sri Lanka's Performance with A Renewable Energy Technology, *Energy for Sustainable Development*, Volume VI, 1, pp. 30-37
- Amon, T., Boxberger, J., Lindworsky, J., Scheibler, M.**, 2003, Biogas Production in Agriculture-Safety Guidelines, Confermentation and Emissions from Combined Heat and Power Couplings, <http://www.ramiran.net/doc98/FIN-ORAL/AMON-THO.pdf>
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T.**, 2006a, Influence of Different Methods of Covering Slurry Stores on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions, *International Congress Series*, 1293, pp. 315– 318
- Amon, Th., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E., Zollitsch, W.**, 2006b, Optimising Methane Yield from Anaerobic Digestion of Manure: Effects of Dairy Systems and of Glycerine Supplementation, *International Congress Series*, 1293, pp. 217– 220
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristl, H., Schreiner, M., Zollitsch, W.**, 2007a, Methane Production Through Anaerobic Digestion of Various Energy Crops Grown in Sustainable Crop Rotations, *Bioresource Technology*, in Press
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., Gruber, L.**, 2007b, Biogas Production from Maize and Dairy Cattle Manure—Influence of Biomass Composition on The Methane Yield, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, pp. 173–182

KAYNAKLAR (devam)

Anon., 1980a, Energy From Biological Processes, <http://www.wws.princeton.edu/ota/disk3/1980/8008/8008.PDF>

Anon., 1980b, Energy from Biological Processes: Volume II— Technical and Environmental Analyses, <http://www.wws.princeton.edu/ota/disk3/1980/8018/8018.PDF>

Anon., 1996, Biomass Fired Plants, Energy Technology Status Report, Detailed Technology Evaluations, Chapter 8, California Energy Commission

Anon., 1997a, Energy From Biomass -Volume 4- Anaerobic Digestion for Biogas, <http://www.dti.gov.uk/files/file14938.pdf>

Anon., 1997b, Energy for The Future: Renewable Sources of Energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan, http://europa.eu/documents/comm/white_papers/pdf/com97_599_en.pdf

Anon., 1998, Biyokütle Enerjisi, <http://www.tubitak.gov.tr/btpd/btspd/platform/enerji/altgrup/cevre/indexpdf.html>

Anon., 1999a, “Biogas Upgrading and Utilisation” IEA Bioenergy, http://www.recyclenow.org/Report_IEA_Bioenergy_1MB.pdf

Anon., 1999b, Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology

Anon., 1999c, Biogas Digest Volume II- Biogas - Application and Product Development, Information and Advisory Service on Appropriate Technology

KAYNAKLAR (devam)

- Anon.,** 1999d, Biogas Digest Volume III- Biogas - Costs and Benefits and Biogas – Programme Implementation, Information and Advisory Service on Appropriate Technology
- Anon.,** 1999e, The Economics of Biogas in the Hog Industry, The Canadian Agricultural Energy End Use Data and Analysis Centre (CAEEDAC), www.usask.ca/agriculture/caedac/PDF/HOGS.pdf
- Anon.,** 1999f, Waste Treatment Systems, GBU, <http://www.gbu-biogas.de/outgoing/gbu-biogas.pdf>
- Anon.,** 2000a, Anaerobic Digestion of Farm and Food Processing Residues, British Biogen, www.mrec.org/biogas/adgpg.pdf
- Anon.,** 2000b, Assessment of Biogas to Energy Generation Opportunities at Commercial Swine Operations in Colorado, WRBEP Contract # 55024, http://manure.coafes.umn.edu/assets/CP_Report_CO_v2.pdf
- Anon.,** 2000c, AT Information: Biogas, http://www5.gtz.de/gate/technfo/biogas/AT_biogas.html
- Anon.,** 2000d, Biogas Flares - State of the Art and Market Review, IEA Bioenergy, Topic report of the IEA Bioenergy, Agreement Task 24- Biological conversion of municipal solid waste http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Flaring_4-4.PDF
- Anon.,** 2000e, Biogas Technology and Biogas Use in Sweden, NOMIK AB, Traffic & Public Transport Authority, Göteborg
- Anon.,** 2000f, Centralised Biogas Plants – A Contribution To Sustainable Agriculture, The Danish Agricultural Advisory Centre, ISBN 87 7470 829 5

KAYNAKLAR (devam)

- Anon.,** 2000g, Demonstration of Biogas Production Using Low Moisture Content Beef Cattle Manure, Western Regional Biomass Energy Program Grant No. 55008, <http://www.westbioenergy.org>
- Anon.,** 2000h, Environmental Benefits of Anaerobic Digestion, EPA (Environmental Protection Agency), <http://www.epa.gov/region09/waste/solid/compost.pdf>
- Anon.,** 2000i, Reducing Barriers to Zero and Low Emission Mobility is the Final Report of the ZEUS Project, <http://www.miljobilar.stockholm.se/upload/3430/Zeus-FinalReport.pdf>
- Anon.,** 2000j, Selecting a Gas Use Option-Chapter 3, <http://epa.gov/agstar/pdf/handbook/chapter3.pdf>
- Anon.,** 2001a, Anaerobic Digesters and Methane Production-Questions That Need To Be Asked and Answered Before Investing Your Money, A3766, <http://www.uwdiscoveryfarms.org/special/methanepubbw.pdf>
- Anon.,** 2001b, Design of Biogas Plant, Biogas Training Center (BRC) Chendu, Sichuan, China, <http://lged.org/sre/Design%20Biogas%20Plant.pdf>
- Anon.,** 2001c, EDUCOGEN- The European Educational Tool on Cogeneration, http://www.cogen.org/Downloadables/Projects/EDUCOGEN_Tool.pdf
- Anon.,** 2001d, Turning Manure Into Gold: Converting Agricultural Waste To Energy, The Ohio Biomass Energy Program Public Utilities Commission of Ohio, <http://www.puco.ohio.gov/emplibrary/files/util/biomass/publications/TurningManuretoGold.pdf>

KAYNAKLAR (devam)

Anon., 2002a, Folkcenter Farm Biogas, Danish Center for Renewable Energy, March 2002

Anon., 2002b, A Centre of Excellence for Renewable Energy in the East of England, Project number 199-02, A report by Douglas-Westwood Limited for the East of England Development Agency

Anon., 2002c, Ballina Case Study, Mayo Energy Agency, The Quay, Ballina, Co. Mayo

Anon., 2002d, Evaluation Study On National Project on Biogas Development, Programme Evaluation Organisation Planning Commission, Government of India, New Delhi

Anon., 2002e, Farm Energy from Manure, Focus on Energy, [http://www.focusonenergy.com/data/common/dmsFiles/W_RB_MKF S_Farm%20energy%20from%20manure.pdf](http://www.focusonenergy.com/data/common/dmsFiles/W_RB_MKF_S_Farm%20energy%20from%20manure.pdf)

Anon., 2002f, Generating Biogas from Source Separated Organic Waste for Energy Production, http://www.toronto.ca/eia/pdf/anaerobic_fulldoc.pdf

Anon., 2003, Use of Solid Biofuels, Liquid Biofuels and Biogas in Europe, 1999 – 2001, <http://mango2.vtt.fi/virtual/eubionet/euroobserver.pdf>

Anon., 2006, State of Renewable Energies in Europe – 2006, [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/barobilan/ barobilan6.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/barobilan/barobilan6.pdf)

KAYNAKLAR (devam)

- Aoki, K., Umetsu, K., Nishizaki, K., Takahashi, J., Kishimoto, T., Tani, M., Hamamoto, O., Misaki, T.,** 2006, Thermophilic Biogas Plant for Dairy Manure Treatment as Combined Power and Heat System in Cold Regions, *International Congress Series*, 1293, pp. 238–241
- Arda, M.,** 2000, Temel Mikrobiyoloji, Medisan Yayın Serisi, No: 46, 548 sayfa
- Arnott, M.,** 1985, The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Peace Corps, Information Collection and Exchange, Reprint R-48
- Aubart, C., Farinet, J.L.,** 1983, Anaerobic Digestion of Pig and Cattle Manure in Large-Scale Digesters and Power Production from Biogas, *Symp.Pap.Energy Biomass Wastes*, VII, 741–766
- Axaopoulos, P., Panagakis, P., Tsavdaris, A., Georgakakis, D.,** 2001, Simulation and Experimental Performance of a Solar-Heated Anaerobic Digester, *Solar Energy*, Vol. 70, 2, pp. 155-164
- Axaopoulos, P., Panagakis P.,** 2003, Energy and Economic Analysis of Biogas Heated Livestock Buildings, *Biomass and Bioenergy*, 24, pp. 239 – 248
- Badawi, M.A., Blanc, F.C., Wise, D.L., El-Shinnawi, M.M., Abo-Elnaga, S.A., El-Shimi, S.A.,** 1992, Anaerobic Treatment with Methane Recovery of Agricultural and Village Wastes, *Resources, Conservation and Recycling*, 7, pp. 305-323
- Bala, B.K., Satter, M.A.,** 1991, System Dynamics Modelling and Simulation of Biogas Production Systems, *Renewable Energy*, Vol. I, 5/6, pp. 723-728

KAYNAKLAR (devam)

- Balsam, J.**, 2002, Anaerobic Digestion of Animal Wastes: Factors to Consider, <http://www.attra.org/attra-pub/PDF/anaerobic.pdf>
- Bayhan, M., Zablocki, M.**,1991, Biogas as Fuel in Agricultural Engines, *13.Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, Konya
- Beba, A.**, 1981, Biyogaz Sistemlerinde Güneş Enerjisinden Yararlanma İmkanları, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 255-269
- Beba, A.**, 1988, Analysis of a Solar-Heated Biogas Fermenter, *Solar Energy*, 40, pp. 281-287
- Berglund, M., Börjesson, P.**, 2006, Assessment of Energy Performance in The Life-Cycle of Biogas Production, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 254–266
- Bhat, P.R., Chanakya, H.N., Ravindranath, N.H.**, 2001, Biogas Plant Dissemination: Success Story of Sirsi, India, *Energy for Sustainable Development*, Volume V, 1, pp. 39-46
- Bhattacharya, S.C., Salam, P.A.**, 2002, Low Greenhouse Gas Biomass Options for Cooking in the Developing Countries, *Biomass and Bioenergy*, 22, pp. 305-317
- Bilir, M., Karabay, E., Deniz, Y., Katlı, N.**, 1982, Biyogazın Önemi, Yararları, Kullanımı, Biyogaz Tesislerinin Tasarımı ve Türkiye’de Yaygınlaştırma Olanakları, T.C. Köyışleri ve Kooperatifler Bakanlığı, Topraksu Genel Müd., Merkez Topraksu Araştırma Enst. Müd., Ankara
- Birkmose, T.**, 2002, Biogas Production - Agriculture, Environment and Energy, The Danish Agricultural Advisory Centre

KAYNAKLAR (devam)

- Bizzo, W.A., de Calan, B., Myers, R., Hannecart, T.,** 2004, Safety Issues for Clean Liquid and Gaseous Fuels for Cooking in The Scope of Sustainable Development, *Energy for Sustainable Development*, Volume VIII, 3, pp. 60-67
- Bohn, I., Björnsson, L., Mattiasson, B.,** 2007, The Energy Balance in Farm Scale Anaerobic Digestion of Crop Residues At 11–37 °C, *Process Biochemistry*, 42, pp. 57–64
- Bolu, A.,** 1987, Eskişehir Koşullarında 13 m³ Kapasiteli Biyogaz Tesisinin Gaz Verimi, T.C. Tarım Orman ve Köyişleri Bakanlığı Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Eskişehir Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, Genel Yayın No: 205, Rapor Serisi No: 155, Eskişehir
- Boone, D.R., Chynoweth, D.P., Mah, R.A., Smith, P.H., Wilkie, A.C.,** 1993, Ecology and Microbiology of Biogasification, *Biomass and Bioenergy*, 5, pp. 191-202
- Bove, R., Lunghi, P.,** 2005, Experimental Comparison of MCFC Performance Using Three Different Biogas Types and Methane, *Journal of Power Sources*, 145, pp. 588–593
- Boyd, R.,** 2000, Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, University of East Anglia, www.green-trust.org/PigSlurryADProject.pdf
- Börjesson, P., Berglund, M.,** 2006, Environmental Systems Analysis of Biogas Systems—Part I: Fuel-Cycle Emissions, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 469–485
- Brini, M., Belaid, H., Graieb, M.,** 1994, A Solar Pilot Biogas Plant, *Energy for Sustainable Development*, Volume I, 4, pp. 34-38

KAYNAKLAR (devam)

- Brown, R.C.**, 1994, Conversion technology, In The Potential for Biomass Production and Conversion in Iowa - Final Report to Iowa Energy Center, Department of Mechanical and Chemical Engineering, Iowa State University, Ames, IA, chapter 4, pp. 209-260
- Brule, M.R., Sofer S.S.**, 1976, A Biogasification System at a Dairy, *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 56, pp. 18-23
- Burton, C.H., Turner, C.**, 2003, Manure Management Treatment Strategies for Sustainable Agriculture, Silsoe Research Institute, ISBN: 0 9531282 6 1
- Butner, R.S., Elliot, D.C., Sealock Jr., L.J., Chynoweth, D.P.**, 1988, A Process Study of the Biothermal Conversion of Water Hyacinths to Methane, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 17, pp. 105-116
- Camargo, E.B.**, 1986, Biogas Clean-Up and Utilization, *Wat. Sci.Techn.*, 18, pp. 143-150
- Chacravarthi, J.**, 1998, Biogas and Energy Production from Cattle Waste,
<http://ieeexplore.ieee.org/iel4/5277/14355/00659266.pdf?arnumber=659266>
- Chanakya, H.N., Ganguli, N.K., Anand, V., Jagadish, K.S.**, 1995, Performance Characteristics of A Solid-Phase Biogas Fermentor, *Energy for Sustainable Development*, Volume I, 6, pp. 43-46
- Chanakya, H.N., Srikumar, K.G., Anand, V., Modak, J., Jagadish, K. S.**, 1999, Fermentation Properties of Agro-residues, Leaf Biomass and Urban Market Garbage in a Solid Phase Biogas Fermenter, *Biomass and Bioenergy*, 16, pp. 417-429

KAYNAKLAR (devam)

- Chanakya, H.N., Bhogle, S., Arun, R.S.,** 2005, Field Experience with Leaf Litter-Based Biogas Plants, *Energy for Sustainable Development*, Volume IX, 2, pp. 49-62
- Chandra, A., Tiwari, G.N., Srivastava, V.K., Yadav, Y.P.,** 1991, Performance Evaluation of Biogas Burners, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 32, pp. 353-358
- Chavez-Vazquez, M., Bagley, D.M.,** 2002, Evaluation of The Performance of Different Anaerobic Digestion Technologies for Solid Waste Treatment, *CSCE/EWRI of ASCE Environmental Engineering Conf.*, Niagara
- Chen, B., Chen, G.Q.,** 2007, Resource Analysis of The Chinese Society 1980–2002 Based on Exergy—Part 2: Renewable Energy Sources and Forest, *Energy Policy*, 35, pp. 2051–2064
- Chen, R.,** 1997, Livestock-Biogas-Fruit Systems in South China, *Ecological Engineering*, 8, pp. 19-29
- Cheng-qiu, J., Tian-wei, L., Jian-li, Z.,** 1989, A Study on Compressed Biogas and Its Application to the Compression Ignition Dual-Fuel Engine, *Biomass*, 20, pp. 53-59
- Chevalier, C., Meunier, F.,** 2005, Environmental Assessment of Biogas Co- Or Tri-Generation Units by Life Cycle Analysis Methodology, *Applied Thermal Engineering*, 25, pp. 3025–3041
- Chynoweth, D.P., Mah, R.A.,** 1971, Volatile Acid Formation in Sludge Digestion, *Advances in Chemistry Series*, 105, pp. 41-54
- Chynoweth, D.P., Mah, R.A.,** 1977, Bacterial Population During Adaptation of Anaerobic Digester Sludge to Glucose, *J. Water Pol. Control Fed.*, 49, pp. 405-412

KAYNAKLAR (devam)

- Chynoweth, D.P.**, 1979, Anaerobic Digestion of Marine Biomass, *paper presented in proceedings of a seminar on Biomass Energy for City, Farm and Industry: Biomass and Alcohol Fuels Production*, pp. 185-192, J. G. Press, Emmaus, PA
- Chynoweth, D.P., Srivastava, V.J., Henry, M.P., Tarman, P.B.**, 1980, Biothermal Gasification of Biomass, *Energy from Biomass and Wastes*, IV, pp. 527-554, Lake Buena Vista, FL
- Chynoweth, D. P.**, 1987, Biomass Conversion Options, in Smith, W.H. and Reddy, R.K., eds., *Aquatic plants for Water Treatment and Resource Recovery*, pp. 621-642, Magnolia Publ. Inc., Orlando, FL
- Chynoweth, D.P., Fannin, K.F., Srivastava, V.J.**, 1987, Biological Gasification of Marine Algae, in Bird, K. T. and Benson, P. H., eds. *Seaweed Cultivation for Renewable Resources*, pp. 285-303, Elsevier, New York
- Chynoweth, D.P. and Isaacson, R.**, 1987, Anaerobic Digestion of Biomass, Springer; 1 edition, 282 p.
- Chynoweth, D.P., Jerger, D.**, 1988, Energy Production From the Methane Fermentation of Hardwoods, *5th International Symposium on Anaerobic Digestion*, Bologna, Italy, pp. 913-916
- Chynoweth, D.P.**, 1992, Global Significance of Biomethanogenesis, in *Global Environmental Chemistry*, in Dunnette, D. and O'Brian, eds., ACS Symposium Series, pp. 338-351
- Chynoweth, D.P., Svoronos, S.A., Lyberatos, G., Harmon, J.L., Pullammanappallil, P., Owens, J.M., Peck, M.J.**, 1994, Real-Time Expert System Control of Anaerobic Digestion, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 30, 12, pp. 21-29

KAYNAKLAR (devam)

- Chynoweth, D.P.**, 1996, Environmental Impact of Biomethanogenesis, *Envir. Monitoring and Assessment*, 42, pp. 3-18
- Chynoweth, D.P., Pullammanappallil, P.**, 1996, Anaerobic Digestion of Municipal Solid Wastes, in Palmisano, A.C. and Barlaz, M.A. eds. *Microbiology of Solid Waste*, CrC Press, Inc., Boca Raton, Florida, pp. 71-113
- Chynoweth, D.P., Wilkie, A.C., Owens, J.M.**, 1999, Anaerobic Treatment of Piggery Slurry, *Asian-Aus. J. Anim Sci.*, 12(4), pp. 607-628
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B.**, 2006, Mitigation of Greenhouse Gas Emissions by Anaerobic Digestion of Cattle Slurry, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, pp. 171–177
- Colleran, E.**, 2000, Hygienic and Sanitation Requirements in Biogas Plants Treating Animal Manures or Mixtures of Manures and Other Organic Wastes, in: *Anaerobic Digestion: Making Energy and Solving Modern Waste Problems*, Ed. H. Ørtenblad, AD-NETT, Herning Municipal Authorities, Denmark, pp. 77-86
- Comakli, K., Yuksel, B.**, 2003, Optimum Insulation Thickness of External Walls For Energy Saving, *Applied Thermal Engineering*, 23:473-479.
- Crookes, R.J.**, 2006, Comparative Bio-Fuel Performance in Internal Combustion Engines, *Biomass and Bioenergy*, 30, pp. 461–468
- Cumby, T.R., Nigro, E., Sandars, D.L., Cañete, C., Williams, A.G., Scotford, I.M., Audsley, E.**, 2000, Cleaning Up Natural Waste on Land -Anaerobic Digestion of Agricultural Wastes, *Cleaning Up the Environment*, Imperial College

KAYNAKLAR (devam)

- Çağlar, A., Uçar, T.,** 1981, Türkiye'de Biyogaz Potansiyeli ve Üretim Kinetiği, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 290-303
- Dalemo, M.I., Sonesson, U.G., Björklund, A.E.,** 1998, Environmental impact of NPK-fertiliser versus anaerobic digestion residue or compost - A systems analysis, *In proceedings of the 8th International Conference on Management Strategies for Organic Waste use in Agriculture*, 26-29 May, Rennes, Brittany, France
- Dangoggo, S. M., Aliyu, M., Atiku, A. T.,** 1996, The Effect of Seeding with Bacteria on Biogas Production Rate, *WREC*, pp. 1045-1048
- Datong, Z.,** 1989, An Analysis of Domestic Biogas Storage Installations in China, *Biomass*, 20, pp. 61-67
- Dayton, D.C.,** 2001, Fuel Cell Integration—A Study of the Impacts of Gas Quality and Impurities, National Renewable Energy Laboratory, NREL/MP-510-30298
- Demirbaş, A.,** 2001, Biomass and the Other Renewable and Sustainable Energy Options for Turkey in the Twenty-First Century, *Energy Sources*, 23, pp. 177- 187
- Demirbaş, A.,** 2004a, Bioenergy, Global Warming, and Environmental Impacts, *Energy Sources*, 26, pp. 225–236
- Demirbaş, A.,** 2004b, The Importance of Biomass, *Energy Sources*, 26, pp. 361–366
- Demuynck, M., Nyns, J., Palz, W.,** 1984, Biogas Plants in Europe, Energy from Biomass Series, 6. D. Reidel Publishing Company, Boston, USA

KAYNAKLAR (devam)

- Dennis, A., Burke, P.E.,** 2001, Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, Options for Recovering Beneficial Products From Dairy Manure, Environmental Energy Company, www.makingenergy.com
- Dogru, M., Midilli, A., Howarth, C.R.,** 2002, Gasification of Sewage Sludge Using A Throated Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis, *Fuel Processing Technology*, 75, pp. 55–82
- Dönmez, S.,** 1981, Biyogaz Reaktörlerinin Mikrobiyolojisi, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 191-200
- Dupla, M., Conte, T., Bouvier, J.C., Bernet, N., Steyer, J.P.,** 2004, Dynamic Evaluation of A Fixed Bed Anaerobic Digestion Process in Response to Organic Overloads and Toxicant Shock Loads, *Water Sci Technol.*, 49(1), pp. 61-68
- Dupont, L., Accorsi, A.,** 2006, Explosion Characteristics of Synthesised Biogas at Various Temperatures, *Journal of Hazardous Materials*, 136, pp. 520–525
- Dutt, G.S., Mills, E.,** 1994, Illumination and Sustainable Development Part II: Implementing Lighting Efficiency Programs, *Energy for Sustainable Development*, Volume I, 2, pp. 17-27
- Easterly, J.L., Lowenstein, M.Z.,** 1986, Cogeneration from Biofuels: A Technical Guidebook, Prepared Under TVA, Contract No. TV-67207A, Tennessee Valley Authority Biomass Program, Southeastern Regional Biomass Energy Program, U.S. Department of Energy
- Ebbeson, B., Stokes, C.A., Stokes, H.,** 2002, Project Gaia: Converting Biomass to A Clean Liquid Fuel for Domestic Use, *Energy for Sustainable Development*, Volume VI, 2, pp. 43-48

KAYNAKLAR (devam)

- Edelmann, W.**, 2002, Products, Impacts and Economy of Anaerobic Digestion of OFMSW, IWA Publishing, Biomethanization of The Organic Fraction of Municipal Solid Wastes, Edited by J. Mata-Alvarez, ISBN: 1 900222 14 0
- Eggeling, G., Mackensen, G., Sasse, L., Stephan, B.**, 1985, Community Plants Manual, BORDA, Bremen
- Eldem, N.Ö., Ozturk, I., Soyer, E., Calli, B., Akgiray, Ö.**, 2004, Ammonia and pH Inhibition in Anaerobic Treatment of Wastewaters, Part I: Experimental, *Journal of Environmental Science and Health*, Part A—Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, Vol. A39, 9, pp. 2405–2420
- El-Mashad, H.M., Van Loon, W.K.P., Zeeman, G.**, 2003, A Model of Solar Energy Utilisation in the Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Biosystems Engineering*, 84 (2), pp. 231–238
- El-Mashad, H.M., W.K.P., Van Loon, G., Zeeman, G.P.A., Bot, G., Lettinga, G.**, 2004a, Design of A Solar Thermophilic Anaerobic Reactor for Small Farms, *Biosystems Engineering*, 87, pp. 79-87
- El-Mashad, H.M., Zeeman, G., van Loon, W.K.P., Bot, G.P.A., Lettinga, G.**, 2004b, Effect of Temperature and Temperature Fluctuation on Thermophilic Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Bioresource Technology*, 95, pp. 191–201
- El-Shimi, S., Arafa, S.**, 1997, Biogas Technology Transfer to Rural Communities in Egypt, http://www.virtualcentre.org/en/dec/toolbox/Tech/EL_S0291.pdf

KAYNAKLAR (devam)

- Engler, C.R., Jordan, E.R., McFarland, M.J., Lacewell, R.D.,** 2002, Economics and Environmental Impact of Biogas Production as a Manure Management Strategy, [http://files.harc.edu/Sites/Gulfcoast CHP/Publications/EconomicsImpactBiogasProduction.pdf](http://files.harc.edu/Sites/Gulfcoast_CHP/Publications/EconomicsImpactBiogasProduction.pdf)
- Eraslan, A.,** 1981, Biyogaz Oluşumunun Biyokimyasal İlkeleri ve Metan Bakterilerinin Beslenme İhtiyaçları, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 173-190
- Ernst, M., Rodecker, J., Luvaga, E., Alexander, T., Kliebenstein, J., Miranowski, J.,** 1999, Viability of Methane Production by Anaerobic Digestion on Iowa Swine Farms, <http://www.ipic.iastate.edu/reports/99swinereports/asl-1693.pdf>
- Eryaşar, A., Koçar, G.,** 2004, Ülkemiz Koşullarında Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Reaktörlerinin Uygulanabilirliği, *Biyoenjerji* 2004, Biyolojik olarak Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, s. 266–278, İzmir.
- Eryaşar, A. ve Koçar, G.,** 2006, Biyogaz Depolama Sistemleri ve Farklı Düşük Basınçların Biyogaz Üretimi Üzerine Etkileri, III. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 24-25-26 Mayıs 2006, Muğla.
- Faaij, A.P.C., Schlamadinger, B., Solantausta, Y., Wagener, M.,** 2002, Large Scale International Bio-Energy Trade, *12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Amsterdam, The Netherlands
- Falvey, M.,** 1996, The Potential for Cogeneration from Manure, Crop Residues, and Food Processing Wastes in Michigan, http://www.michigan.gov/documents/CIS_EO_Cogeneration_C-16_87920_7.pdf

KAYNAKLAR (devam)

- Fischer, T., Krieg, A.**, 2002a, Agricultural Biogas Plants – Worldwide, Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, <http://www.kriegfischer.de/texte/Agricultural%20Biogas%20Plants%20worldwide.pdf>
- Fischer, T., Krieg, A.**, 2002b, Farm-Scale Biogas Plants, Krieg & Fischer Ingenieure GmbH, <http://www.kriegfischer.de/texte/farm-scale%20biogas%20plants.pdf>
- Fredriksson, H., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, A., Nore'n, O., Hansson, P.A.**, 2006, Use of on-Farm Produced Biofuels on Organic Farms – Evaluation of Energy Balances and Environmental Loads for Three Possible Fuels, *Agricultural Systems*, 89, pp. 184–203
- Fry, L. John**, 1973, Methane Digesters for Fuel Gas and Fertilizer - With Complete Instructions For Two Working Models, The New Alchemy Institute, Massachusetts
- Gale, S.**, 2001, Modern Residuals Processing in Theory and Practice, http://www.hatch.ca/Sustainable_Development/Articles/organics_processing_2001.pdf
- Ghaly, A.E., Singh R.K.**, 1984, Desing, Construction and Testing of an Energy Efficient Innovative-Farmscale Anaerobic Digester, Technical University of Nova Scotia, Department of Agricultural Engineering, http://res2.agr.ca/initiatives/manurenet/download/ghaly_1984.pdf
- Gielen, D.J., Gerlagh, T., Bos, A.J.M.**, 1998, Biomass for Energy or Materials, The Netherlands Energy Research Foundtation ECN, Project Number: 77018-77125
- Gomez, J.G., Gonzalez, G.V.**, 1977, The Use of Anaerobically Digested Cattle Slurry As A Fertilizer for Vegetables, *Trop. Anim. Prod.*, 4:1, pp. 26-30

KAYNAKLAR (devam)

- Göğüş, A.Y.**, 1986, İşte Biyogaz, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, Cilt 9, Sayı 4, ss.42-44
- Gruber, E., Herz, H.**, 1996, The Role of Small-Scale Biogas Production in Rural Areas for Sustainable Development in Germany and Peru, *Energy for Sustainable Development*, Volume III, 4, pp. 58-63
- Gunaseelan, V.N.**, 1997, Anaerobic Digestion of Biomass for Methane Production: A Review, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13, 1/2, pp. 83-114
- Gupta, R.A., Rai, S.N., Tiwari, G.N.**, 1988, An Improved Solar Assisted Biogas Plant (Fixed Dome Type): A Transient Analysis, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 28, 1, pp. 53-57
- Gustavsson, M.**, 2000, Biogas Technology-Solution in Search of Its Problem – A Study of Small-Scale Rural Technology Introduction and Integration", Göteborg University, Göteborg
- Hagen, M., Polman, E., Myken, A., Jensen, J., Jönsson, O., Dahl, A.**, 2001, Adding Gas from Biomass to the Gas Grid, Contract No: XVII/4.1030/Z/99-412, Final Report, <http://uk.dgc.dk/pdf/altener.pdf>
- Hammad, M., Badarneh, D., Tahboub, K.**, 1999, Evaluating Variable Organic Waste to Produce Methane, *Energy Conversion and Management*, 40, pp. 1463-1475
- Hansen, K.H., Angelidaki, I., Ahring, B.K.**, 1999, Improving Thermophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure, *Wat. Res.*, Vol. 33, 8, pp. 1805-1810

KAYNAKLAR (devam)

- Harmon, J.L., Svoronos, S.A., Lyberatos, G., Chynoweth, D.P.,** 1993, Adaptive Temperature Optimization of Continuous Anaerobic Digesters, *Biomass and Bioenergy*, 5, pp. 279-288
- Hasan, A.,** 1999, Optimizing Insulation Thickness For Buildings Using Life Cycle Cost, *Applied Energy*, 63:115-124.
- Henham, A., Makkar, M.K.,** 1998, Combustion of Simulated Biogas in a Dual-Fuel Diesel Engine, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 39, No. 16-18, pp. 2001-2009
- Hepbash, A., Balta, M.T.,** 2007, A Study on Modeling and Performance Assessment of A Heat Pump System for Utilizing Low Temperature Geothermal Resources in Buildings, *Building and Environment*, 42, pp. 3747-3756
- Ho, Z.Y.,** 2001, Optimisation of Catalysts for Low Pressure Methanol Synthesis from Biogas, <http://www.cheque.uq.edu.au/ugrad/theses/2001/Pdf/Z.YingHo.PDF>
- Hocking, R.P., Timbers, G.E., Fallis, J.,** 1984, A Farm Scale Anaerobic Digester Phase 1. Construction Start up and Operation, Agriculture Canada, Research Branch, Report I – 673
- Hoogwijk, M.,** 2004, On The Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources, http://www.mnp.nl/images/thesis/MHoogwijk_tcm61-28001.pdf
- Huang, J., Crookes, R.J.,** 1998, Assessment of Simulated Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine, *Fuel*, Vol. 77, 15, pp. 1793-1801

KAYNAKLAR (devam)

- Hudson, G., Patel, N., Haskard, P.,** 2001, The Development of An Efficient Combustion System that Fires Bio-Fuels, for Use in Rural Areas of The Philippines, http://www.mecheng.adelaide.edu.au/courses/undergrad/projects/level4papers2001/hudson_patel_haskard.pdf
- Intrachandra, N., Tongta, S., Meeyoo, V.,** 2002, Biogas Production from Co-Digestion of Animal Wastes, *The Proceeding of the 9th APCChE Congress and CHEMECA 2002*, Christchurch, New Zealand
- Ishikawa, S., Hoshiba, S., Hinata, T., Hishinuma, T., Morita, S.,** 2006, Evaluation of A Biogas Plant from Life Cycle Assessment (LCA), *International Congress Series*, 1293, pp. 230–233
- Ivens, U.I., Ebbenhøj, N., Poulsen, O.M., Skov, T.,** 1997, Gastrointestinal Symptoms Among Waste Recycling Workers, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 4, pp. 153–157
- Jain, M.K., Singh, R., Tauro, P.,** 1981, Anaerobic Digestion of Cattle and Sheep Wastes, *Agricultural Wastes*, 3, pp. 65-73
- Jain, M.K., Singh, R., Tauro, P.,** 1983, Cattle Waste Anaerobic Digestion in a Semi-Continuous and a Batch Digester, *Agricultural Wastes*, 7, pp. 251-259
- Jash, T., Basu, S.,** 1999, Development of a Mini-Biogas Digester for Lighting in India, *Energy*, 24, pp. 409-411
- Jenangi, L.,** 1981, Producing Methane Gas From Effluent, Adelaide University Diploma in Agricultural Production, www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf

KAYNAKLAR (devam)

- Jensen, J.K., Jensen, A.B.,** 2000, Biogas And Natural Gas Fuel Mixture For The Future, *1st World Conference And Exhibition on Biomass For Energy And Industry*, Sevilla
- Jerger, D.E., Dolenc, D., Chynoweth, D.P.,** 1982, Bioconversion of Woody Biomass as a Renewable Source of Energy, *Biotech. Bioeng. Symp.*, No. 12, pp. 233-248
- Jewell, W.J., Koelsch, R.K., Cummings, R.J.,** 1986, Cogeneration of Electricity and Heat from Biogas, SERI/STR-231-2844, Golden, Colorado
- Jiang, Z., Steinsberger, S.C., Shih, J.C.H.,** 1987, In Situ Utilization of Biogas on a Poultry Farm: Heating, Drying and Animal Brooding, *Biomass*, 14, pp. 269-281
- Jingjing, L., Xing, Z., DeLaquil, P., Larson, E.D.,** 2001, Biomass Energy in China and Its Potential, *Energy for Sustainable Development*, Volume V, 4, pp. 66-80
- Johansson, B.,** 1999, The Economy of Alternative Fuels When Including the Cost of Air Pollution, *Transportation Research*, Part D 4, pp. 91-108 (BG-101)
- Junfeng, L., Li, Z., Runqing, H., Zhengmin, Z., Jingli, S., Yangin, S.,** 2002, Policy Analysis of The Barriers to Renewable Energy Development in The People's Republic of China, *Energy for Sustainable Development*, Volume IV, 3, pp. 11-20
- Jungingera, M., de Vissera, E., Hjort-Gregersenb, K., Koornneefa, J., Ravenc, R., Faaija, A., Turkenburg, W.,** 2006, Technological Learning in Bioenergy Systems, *Energy Policy*, 34, pp. 4024-4041

KAYNAKLAR (devam)

- Kalia, A.K., Kanwar, S.S.**, 1998, Long-Term Evaluation of a Fixed Dome Janata Biogas Plant in Hilly Conditions, *Bioresource Technology*, 65, pp. 61-63
- Kalia, A.K., Singh, S.P.**, 1999, Case Study of 85 m³ Floating Drum Biogas Plant Under Hilly Conditions, *Energy Conversion & Management*, 40, pp. 693-702
- Kansal, A., Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Lata, K., Kishore, V.V.N.**, 1998, Anaerobic Digestion Technologies for Energy Recovery from Industrial Wastewater - A Study in Indian Context, *TERI Information Monitor on Environmental Science*, 3(2), pp. 67-75
- Kanwar, S.S., Guleri, R.L.**, 1994, Performance Evaluation of a Family-Size, Ruber-Balloon Biogas Plant Under Hilly Conditions, *Bioresource Technology*, 50, pp. 119-121
- Kapdi, S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K., Prasad, R.**, 2005, Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context, *Renewable Energy*, 30, pp. 1195-1202
- Karakuşçu, M., Karabay, E., Bilir, M., Öztürkcan, C.**, 1981, Türk Hükümeti - Unicef Ortak Biyogaz Projesi, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 118-157
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K.T., Al-Dahhan, M.H.**, 2005a, Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mode of Mixing, *Water Research*, 39, pp. 3597-3606
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., Al-Dahhan, M.H.**, 2005b, Anaerobic Digestion of Animal Waste: Waste Strength Versus Impact of Mixing, *Bioresource Technology*, 96, pp. 1771-1781

KAYNAKLAR (devam)

- Karim, K., Klasson, K.T, Hoffmann, R., Drescher, S.R., DePaoli, D.W., Al-Dahhan, M.H.,** 2005c, Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mixing, *Bioresource Technology*, 96, pp. 1607–1612
- Kartha, S., Larson, E.D.,** 2000, Bioenergy Primer Modernised Biomass Energy for Sustainable Development, United Nations Publications, ISBN number 92-1-126127-9
- Kartha, S.,** 2001, Biomass Sinks and Biomass Energy: Key Issues in Using Biomass to Protect The Global Climate, *Energy for Sustainable Development*, Volume V, 1, pp. 10-14
- Kartha, S., Leach, G., Rajan, S.C.,** 2005, Advancing Bioenergy for Sustainable Development Guideline for Policymakers and Investors, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank
- Karve, A.D., Karve, P., Kulkarni, G.,** 2005, A New Compact Biogas System Based on Sugary/Starchy Feedstock, *Energy for Sustainable Development*, Volume IX, 1, pp. 63-65
- Kashyap, D.R., Dadhich, K.S., Sharma, S.K.,** 2003, Biomethanation Under Psychrophilic Conditions: A Review, *Bioresource Technology*, 87, pp. 147–153
- Kaygusuz, K.,** 2001, Hydropower and Biomass as Renewable Energy Sources in Turkey, *Energy Sources*, 23, pp. 775 – 799
- Kaygusuz, K., Kaygusuz, A.,** 2002, Energy and Sustainable Development in Turkey. Part I: Energy Utilization and Sustainability, *Energy Sources*, 24, pp. 483–498

KAYNAKLAR (devam)

- Kaygusuz, K., Turker, M.F.**, 2002a, Biomass Energy Potential in Turkey, *Renewable Energy*, 26, pp. 661-678
- Kaygusuz, K., Türker, M.F.**, 2002b, Review of Biomass Energy in Turkey, *Energy Sources*, 24, pp. 383-401
- Kaygusuz, K., Sarı, A.**, 2003, Renewable Energy Potential and Utilization in Turkey, *Energy Conversion and Management*, 44, pp. 459-478
- Kelly, C.A., Chynoweth, D.P.**, 1979, Methanogenesis: Measure of Chemo-Organotrophic (Heterotrophic) Activity to Anaerobic Lake Sediments, in Costerton, J. W. and Colwell, R. R., eds., in *Native Aquatic Bacteria: Enumeration Activity, and Ecology*, ASTM 695, pp. 164-179, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA
- Keshtkar, A., Meyssami, B., Abolhamd, G., Ghaforian, H., Asadi M.K.**, 2003, Mathematical Modeling of Non-Ideal Mixing Continuous Flow Reactors for Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Bioresource Technology*, 87, pp. 113-124
- Kırımhan, S.**, 1981, Biyogazın Oluşumu - Özellikleri ve Türkiye'de Yararlanma İmkanları, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 158-172
- Kirtz, M.M.**, 2003, Experience and foresight of Biogas in Lower Austria, *III. International Slovak Biomass Forum*, February 3rd-4th, Bratislava, Slovakia
- Kishore, V.V.N., Raman, P., Rao, V.V.R.**, 1987, Fixed Dome Biogas Plants-A Desing, Construction and Operation Manual, Tata Energy Research Institute, New Delhi

KAYNAKLAR (devam)

- Kishore, V.V.N.**, 1989, A Heat-Transfer Analysis of Fixed-Dome Biogas Plants, *Biological Wastes*, 30, pp. 199-215
- Kivaisi, A.K., Mtila, M.**, 1998, Production of Biogas from Water Hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) (Mart) (Solms) in a Two-Stage Bioreactor, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 14, pp. 125-131
- Klein, J.**, 2002, Anaerobic Wastewater Treatment – the Anaerobic Digestion of Lipids, Tampere University of Technology, Department of Environmental Engineering.
<http://studweb.studserv.uni-stuttgart.de>
- Klingler, B.**, 2000, Environmental Aspects of Biogas Technology, <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d7env.pdf>
- Kocar, G., Eryasar, A.**, 2005, Energy and Economic Analysis of a 25 m³ Biogas Reactor for a Medium Size Farm, IEEEES2, Proceedings of the Second International Exergy, Energy and Environment Symposium, 3-7 July, Kos, Greece.
- Kocar, G.**, 2007, Anaerobic Digesters: from Waste to Energy Crops as Alternative Energy Source, *Energy Sources* (in Press)
- Kocar, G., Eryasar, A.**, 2007, An Application of Solar Energy Storage in Gas: Solar Heated Biogas Plants, *Energy Sources* (in Press).
- Kocar, G., Eryasar, A., Illeez, B.**, 2007, Biogas Feasibility in Energy requirement of a Rural House in Izmir/ Turkey, The 3rd International Energy, Exergy and Environment Symposium, 1-5 July Evora, Portugal

KAYNAKLAR (devam)

- Koç, Y., Koç, A., Bulgan, A.T., Akçakoyun, N.,** 1990, Biyogaz Üretimi ve Tesislerin Projelendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2, ss. 3-19
- Koçar, G., Atayol, A.A., İllez, B., Eryaşar, A.,** 2003, Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Reaktörlerinin Oluşturulmasında Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 76, 52-59.
- Kocar, G., Eryasar, A.,** 2004, Biyogaz Ünitesinin Oluşturulması ve Değişik Organik Kökenli Artıkların Değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi Araştırma Fonu, Proje Raporu, Proje no. 2000/GEE/002
- Koçar, G., Eryaşar, A., İllez, B., Atayol, A.A.,** 2007a, Güneş Enerjisi Destekli Biyogaz Sistemleri, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 98, 19-26.
- Koçar, G., Eryaşar, A., İllez, B., Kutlu, Ö., Arıcı, Ş.,** 2007b, Biyogaz Reaktörlerinde Yaz ve Kış Şartlarına Göre Dizayn Edilen Güneş Enerjisi Destekli Isıtma Sistemlerinin Ekonomik Açıdan Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyum ve Sergisi, 8-9-10 Haziran, Mersin
- Komiyama, M., Misonou, T., Takeuchi, S., Umetsu, K., Takahashi, J.,** 2006, Biogas as A Reproducible Energy Source: Its Steam Reforming for Electricity Generation and for Farm Machine Fuel, *International Congress Series*, 1293, pp. 234–237
- Köse, F.,** 1998, Güneş Isıtmalı Biyogaz Üretimi, *Enerji Workshop-I*, Alternatif Enerji Kaynakları, Selçuk Üniversitesi-Ege Üniversitesi, Konya, Ekim 98, ss. 94-100

KAYNAKLAR (devam)

- Köttner, M.**, 2003, Dry Fermentation - A New Method for Biological Treatment in Ecological Sanitation Systems (Ecosan) for Biogas and Fertilizer Production from Stackable Biomass Suitable for Semiarid Climates, <http://www2.gtz.de/ecosan/download/CESMA2002-Koettner.pdf>
- Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J.P., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D.**, 2005, Biomethane from Dairy Waste: A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California, http://www.calstart.org/info/publications/Biomethane_from_Dairy_Waste_Full_Report.pdf
- Krumbeck, M., Klinge, T., Döding, B.**, 2006, First European Fuel Cell Installation with Anaerobic Digester Gas in A Molten Carbonate Fuel Cell, *Journal of Power Sources*, 157, pp. 902–905
- Kumar, T.S.**, 2000, The Afpro-Chf/Partners Biogas Project - Lessons Learned: The Indian Perspective, <http://www.chf-partners.ca/downloads/ja99less.pdf>
- Lafitte-Trouque, S., Forster, C.F.**, 2002, The Use of Ultrasound and γ -Irradiation as Pre-Treatments for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge at Mesophilic and Thermophilic Temperatures, *Bioresource Technology*, 84, pp. 113-118
- Langhans, G.**, 2002, Manure and Biowaste Digestion in Germany - History, Trends and Practical Verification, Linde-KCA-Dresden GmbH, [www.linde-kca.com/WGAP /kca/file/ fachberichte/Biowaste-Digestion.pdf](http://www.linde-kca.com/WGAP/kca/file/fachberichte/Biowaste-Digestion.pdf);jsessionid=0000JxfBSwFIsQibgWnnxEWBS3:-1
- Lantza, M., Svensson, M., Björnsson, L., Börjesson, P.**, 2007, The Prospects for An Expansion of Biogas Systems in Sweden—Incentives, Barriers and Potentials, *Energy Policy*, 35, pp. 1830–1843

KAYNAKLAR (devam)

- Leggett, J.A., Graves, R.E., Lanyon, L.E.,** 2002, Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction from Manure, <http://www.age.psu.edu/extension/factsheets/g/G77.pdf>
- Lichtman, R., Ellegård, A., Lal, S., Sharma, N.,** 1996, The Improved Biogas Systems Project: Results and Future Work, *Energy for Sustainable Development*, Volume III, 4, pp. 28-42
- Lo, K.V., P.H., Liao, A.J., Whitehead, N.R., Bulley,** 1984, Mesophilic Anaerobic Digestion of Screened and Unscreened Dairy Manure, *Agricultural Wastes*, 11, pp. 269-283
- Lo, K.V., Liao, P.H.,** 1985, Two-Phase Anaerobic Digestion of Screened Dairy Manure, *Biomass*, 8, pp. 81-90
- Lusk, P.,** 1998, Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-580-25145
- Machenbach, I.,** 1999, Thermal Hydrolysis of Sewage Sludge and Wet-Organic Waste, NTNU The Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Dept. of Hydraulic and Environmental Engineering
- Madeley, J.,** 1981, Problems of Biogas Production, *Energy Policy*, Volume 9, 4, December, Page 328
- Madhukara, K., Srilatha, H.R., Srinath, K., Bharathi, K., Nand, K.,** 1997, Production of Methane from Green Pea Shells in Floating Dome Digesters, *Process Biochemistry*, Vol. 32, 6, pp. 509-513

KAYNAKLAR (devam)

- Maekawa, T.**, 1999, Biomass Gas Fuels, CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume 5, Energy and Biomass Engineering, Published by the American Society of Agricultural Engineers, ISBN 0-929355-97-0, pp. 201-222
- Maeng, H., Lund, H., Hvelplund, F.**, 1999, Biogas Plants in Denmark: Technological and economic Developments, *Applied Energy*, 64, pp. 195-206
- Mandal, T., Mandal, N.K.**, 1997, Comparative Study of Biogas Production from Different Waste Materials, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol.38, 7, pp. 679-683
- Marchaim, U.**, 1992, Biogas Processes for Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 92-5-103126-6
- Marti'nez-Pe'rez, N., Cherryman, S.J., Premier, G.C., Dinsdale, R.M., Hawkes, D.L., Hawkes, F.R., Kyazze, G., Guwy, A.J.**, 2007, The Potential for Hydrogen-Enriched Biogas Production from Crops: Scenarios in The UK, *Biomass and Bioenergy*, in Press
- Martin, J.H.**, 2003, A Comparison of Dairy Cattle Manure Management with and without Anaerobic Digestion and Biogas Utilization, EPA Contract #68-W7-0068 Task Order 400
- Masse, D.I., Lu, D., Masse, L., Droste, R.L.**, 2000, Effect of Antibiotics on Psychrophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure Slurry in Sequencing Batch Reactors, *Bioresource Technology*, 75, pp. 205-211

KAYNAKLAR (devam)

- Mata-Alvarez, J., Mace, S., Llabres, P.,** 2000, Anaerobic Digestion of Organic Solid Wastes: An Overview of Research Achievements and Perspectives, *Bioresource Technology*, 74, pp. 3-16
- Matsunaka, T., Sawamoto, T., Ishimura, H., Takakura, K., Takekawa, A.,** 2006, Efficient Use of Digested Cattle Slurry from Biogas Plant with Respect to Nitrogen Recycling in Grassland, *International Congress Series*, 1293, pp. 242–252
- Mazza, P.,** 2002, Harvesting Clean Energy for Rural Development – Biogas, Climate Solutions Special Report, http://www.harvestcleanenergy.org/documents/Biogas_Report.pdf
- McKendry, P.,** 2002a, Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass, *Bioresource Technology*, 83, pp. 37–46
- McKendry, P.,** 2002b, Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion Technologies, *Bioresource Technology*, 83, pp. 47–54
- Mears, D.T.,** 2001, Biogas Applications for Large Dairy Operations: Alternatives to Conventional Engine-Generators, Cornell Cooperative Extension Association of Wyoming County
- Mehta, A.,** 2002, The Economics and Feasibility of Electricity Generation using Manure Digesters on Small and Mid-size Dairy Farms, Department of Agricultural and Applied Economics, Energy Analysis and Policy Program, University of Wisconsin – Madison
- Mendis, M.S., Van Nes, W.J.,** 2001, Biogas in rural household energy supply: The Nepal Biogas Support Program, www.unescap.org/esd/energy/information/biomass_seminar/StakeholdersNepal.pdf

KAYNAKLAR (devam)

- Mengjie, W.**, 2002, Biogas Technology and Ecological Environment Development in Rural Areas of China, http://ecosanres.sei.se/pdf_files/Nanning_PDFs/Eng/Wang%20Mengjie%2012_C19.pdf
- Misra, U., Singh, S., Singh, A., Pandey, G.N.**, 1992, A New Temperature Controlled Digester for Anaerobic Digestion for Biogas Production, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 33, 11, pp. 983-986
- Mitzlaff, K.Von**, 1988, Engines for Biogas, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH
- Monnet, F.**, 2003, An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes, http://www.remade.org.uk/documents/reports/An%20Introduction%20to%20Anaerobic%20Digestion%20_27153953177.pdf
- Monteny, G.J., Bannink, A., Chadwick, D.**, 2006, Greenhouse Gas Abatement Strategies for Animal Husbandry, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, pp. 163–170
- Mshandetea, A., Björnsson, L., Kivaisia, A.K., Rubindamayugia, M.S.T., Mattiasson, B.**, 2006, Effect of Particle Size on Biogas Yield from Sisal Fibre Waste, *Renewable Energy*, 31, pp. 2385–2392
- Muche, H., Zimmermann, H.**, 1985, The Purification Of Biogas, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit(GTZ) GmbH, Eschborn

KAYNAKLAR (devam)

- Munoz, F., López, R.,** 2000, Anaerobic Digestion System Installation of Cattle Manure in Two Farms in Puebla, Mexico, [http://wire0.ises.org/wire/doclibs/SWC1999.nsf/id/3F44A0AE2F22F70CC1256920003D61FF/\\$File/221.pdf](http://wire0.ises.org/wire/doclibs/SWC1999.nsf/id/3F44A0AE2F22F70CC1256920003D61FF/$File/221.pdf)
- Murnleitner, E., Becker, T.M., Delgado, A.,** 2002, State Detection and Control of Overloads in The Anaerobic Wastewater Treatment Using Fuzzylogic, *Water Research*, 36, pp. 201–211
- Murphy, J.D., McCarthy, K.,** 2005, The Optimal Production of Biogas for Use as A Transport Fuel in Ireland, *Renewable Energy*, 30, pp. 2111–2127
- Murphy, J.D., McKeogh, E.,** 2006, The Benefits of Integrated Treatment of Wastes for The Production of Energy, *Energy*, 31, pp. 294–310
- Mwenya, B., Sar, C., Pen, B., Morikawa, R., Takaura, K., Kogawa, S., Kimura, K., Umetsu, K., Takahashi, J.,** 2006, Effect of Feed Additives on Ruminant Methanogenesis and Anaerobic Fermentation of Manure in Cows and Steers, *International Congress Series*, 1293, pp. 209– 212
- Nand, K., Devi, S.S., Viswanath, P., Deepak, S., Sarada, R.,** 1991, Anaerobic Digestion of Canteen Wastes for Biogas Production: Process Optimisation, *Process Biochemistry*, 26, pp. 1-5
- Nelson, C., Lamb, J.,** 2002, Final Report: Haubenschild Farms Anaerobic Digester, The Minnesota Project, [www.mnproject.org/pdf/Haubyrptup dated.pdf](http://www.mnproject.org/pdf/Haubyrptup%20dated.pdf)
- Ni, J.Q., Nyns, E.J.,** 1996, New Concept for the Evaluation of Rural Biogas Management in Developing Countries, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 37, 10, pp. 1525-1534

KAYNAKLAR (devam)

- Nielsen, L.H., Hjort-Gregersen, K.**, 2002, Socio-economic Analysis of Centralised Biogas Plants, <http://www.organic.aber.ac.uk/library/biogas.pdf>
- Nijaguna, B.T.**, 2002, Biogas Technology, New Age International Publishers, New Delhi, 289 p.
- Nishimura, S., Yoda, M.**, 1997, Removal of Hydrogen Sulfide from an Anaerobic Biogas Using A Bio-Scrubber” *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, 6-7, pp. 349-356
- Nonhebel, S.**, 2005, Renewable Energy and Food Supply: Will There be Enough Land?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, pp. 191–201
- O'keefe, D.M., Brigmon, R.L., Chynoweth, D.P.**, 2000, Influence of Methane Enrichment by Aeration of Recirculated Supernatant on Microbial Activities During Anaerobic Digestion, *Bioresource Technology*, 71, pp. 217-224
- Omer, A.M., Fadalla Y.**, 2003, Biogas Energy Technology in Sudan, *Renewable Energy*, 28, pp. 499–507
- Pagilla, K.R., Kim, H., Cheunbarn, T.**, 2000, Aerobic Thermophilic and Anaerobic Mesophilic Treatment of Swine Waste, *Wat. Res.*, Vol. 34, 10, pp. 2747-2753
- Painuly, J.P., Rao, H., Parikh, J.**, 1995, A Rural Energy-Agriculture Interaction Model Applied to Karnataka State, *Energy*, Vol. 20, 3, pp. 219-233
- Palmer, D.G.**, 1981, Biogas: Energy from Animal Waste, U.S. Government Printing Office 781-145, SERI

KAYNAKLAR (devam)

- Park, D., Lee, D.S., Joung, J.Y., Park, J.M.,** 2005, Comparison of Different Bioreactor Systems for Indirect H₂S Removal Using Iron-Oxidizing Bacteria, *Process Biochemistry*, 40, pp. 1461–1467
- Patrabansh, S., Madan, M.,** 2000, An Alternative Resource for Biogas Production, *Energy Sources*, 22, pp.713-722
- Pauss, A., Nyns, E.J.,** 1993, Past, Present and Future Trends in Anaerobic Digestion Applications, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 4, 4, pp. 263-270
- Peck, M.W., Hawkes, F.R.,** 1987, Anaerobic Digestion of Cattle Slurry in an Upflow Anaerobic Digester, *Biomass*, 13, pp. 125-133
- Pekin, B.,** 1983, Biyokimya Mühendisliği (Biyoteknoloji), Ege Üniversitesi Kimya Fakültesi Yayınları, No:3, İzmir, ss. 368-385
- Pellerin, R.A., Walker, L.P., Heisler, M.G., Farmer, G.S.,** 1988, Operation and Performance of Biogas-Fueled Cogeneration Systems, *Energy in Agriculture*, 6, pp. 295-310
- Piccinini, S., Fabbri, C., Riva, G.,** 1996, Biogas Use in Pig Breeding: Sizing and Installation of Cogenerators in Italy, <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d2cogene.pdf>
- Ping, Z.J.,** 2001, China's New and Renewable Energy Situation, http://www.energyagency.at/publ/pdf/china_res.pdf
- Porpatham, E., Ramesh, A., Nagalingam, B.,** 2007, Effect of Hydrogen Addition on The Performance of A Biogas Fuelled Spark Ignition Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, in Press

KAYNAKLAR (devam)

- Pound, B., Done, F., Preston, T.R.**, 1981, Biogas Production from Mixtures of Cattle Slurry and Pressed Sugar Cane Stalk, With and Without Urea, *Trop. Anim. Prod.*, 6, pp. 11-21
- Pullammanappallil, P., Svoronos, S.A., Chynoweth, D.P., Lyberatos, G.**, 1998, Expert System for The Control of Anaerobic Digesters, *Biotechnology and Bioengineering*, 58(1), pp. 13-22
- Pullammanappallil, P.C., Chynoweth, D.P., Lyberatos, G., Svoronos, S.A.**, 2001, Stable Performance of Anaerobic Digestion in the Presence of a High Concentration of Propionic Acid, *Bioresource Technology*, 78(2), pp. 165-169
- Puñal, A., Palazzotto, L., Bouvier, J.C., Conte, T., Steyer, J.P.**, 2003, Automatic Control of VFA in Anaerobic Digestion Using A Fuzzy Logic Based Approach, *Water Science & Technology*, Vol. 48, 6, pp. 103–110
- Purohit, P., Kandpal, T.C.**, 2007, Techno-Economics of Biogas-Based Water Pumping in India: An Attempt to Internalize CO₂ Emissions Mitigation and Other Economic Benefits, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 1208–1226
- Qia, X., Zhang, S., Wang, Y., Wang, R.**, 2005, Advantages of The Integrated Pig-Biogas-Vegetable Greenhouse System in North China, *Ecological Engineering*, 24, pp. 177–185
- Raheman, H.**, 2002, A Mathematical Model for Fixed Dome Type Biogas Plant, *Energy*, 27, pp. 25-34
- Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., Kishore, V.V.N.**, 2000, State-of-Art of Anaerobic Digestion Technology for Industrial Wastewater Treatment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, pp. 135-156

KAYNAKLAR (devam)

- Ram, M.S., Singh, L., Suryanarayana, M.V.S., Alam, S.I.,** 2000, Effect of Iron, Nickel and Cobalt on Bacterial Activity and Dynamics During Anaerobic Oxidation of Organic Matter, *Water, Air, and Soil Pollution*, 117, pp. 305–312
- Ramana, P.V., Dutta, S., Hazarika, N., Kukrety, N.,** 1994, Biogas Technology - A Promise for the Future, Tata Energy Research Institute, New Delhi
- Ravena, R.P.J.M., Gregersen, K.H.,** 2007, Biogas plants in Denmark: Successes and Setbacks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 116–132
- Reddy, A.C., Rao, Y.J.,** 1996, Biogas from An Industrial Waste, *Energy for Sustainable Development*, Volume III, 1, pp. 41-43
- Reddy, A.K.N.,** 2004, Lessons from The Pura Community Biogas Project, *Energy for Sustainable Development*, Volume VIII, 3, pp. 68-73
- Roubaud, A., Favrat, D.,** 2005, Improving Performances of A Lean Burn Cogeneration Biogas Engine Equipped with Combustion Prechambers, *Fuel*, 84, pp. 2001–2007
- Rozdilsky, J.L.,** 1997, Farm-Based Anaerobic Digestion in Michigan: History, Current Status and Future Outlook, A Report of The Michigan Biomass Energy Program, http://www.michigan.gov/documents/CIS_EO_anaerobic_AWa-8_87909_7.pdf
- Rubia, M.A. de la, Perez, M., Romero, L.I., Sales, D.,** 2002, Anaerobic Mesophilic and Thermophilic Municipal Sludge Digestion, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 16 (3), pp. 119–124

KAYNAKLAR (devam)

- Ruggeri, B.**, 1986, Kinetic and Thermal Aspects of Biogas Production, *Agricultural Wastes*, 16, pp. 183-200
- Safley, Jr., L.M., Vetter, R.L., Smith, L.D.**, 1987, Management and Operation of a Full-Scale Poultry Waste Digester, *Poultry Science*, 66, pp. 941-945
- Sambo, A.S., Garba, B., Danshehu, B.G.**, 1995, Effect of Some Operating Parameters on Biogas Production Rate, *Renewable Energy*, Vol. 6, 3, pp. 343-344
- Santana, A., Pound, B.**, 1980, The Production of Biogas From Cattle Slurry, The Effects of Concentration of Total Solids and Animal Diet, *Trop. Anim. Prod.*, 5:2, pp. 130-135
- Santerre, M.T., Smith, K.R.**, 1982, Measures of Appropriateness: The Resource Requirements of Anaerobic Digestion (Biogas) Systems, *World Development*, Vol. 10, 3, pp. 239-261
- Sarapatka, B.**, 1993, A Study of Biogas Production During Anaerobic Fermentation of Farmyard Manure, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 5, 5, pp. 387-393
- Sasaki, K., Watanabe, K., Shiosaki, K., Susuki, K., Teraoka, Y.**, 2004, Multi-Fuel Capability of Solid Oxide Fuel Cells, *Journal of Electroceramics*, 13, pp. 669-675
- Sasse, L.**, 1988, Biogas Plants, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

KAYNAKLAR (devam)

- Sasse, L., Kellner, C., Kimaro, A.,** 1991, Improved Biogas Unit for Developing Countries, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH
- Schlicht, A.C.,** 1999, Digester Mixing Systems Can You Properly Mix with too Little Power?, Walker Process Equipment, www.walker-process.com/papers/DIGMIX.pdf
- Schmidt, J.E., Mladenovska, Z., Lange, M., Ahring, B.K.,** 2000, Acetate Conversion in Anaerobic Biogas Reactors: Traditional and Molecular Tools for Studying this Important Group of Anaerobic Microorganisms, *Biodegradation*, 11, pp. 359-364
- Seadi, T.A.,** 2001, Good Practice Quality Management of AD Residues from Biogas Production, Task 24-Energy from Biological Conversion of Organic Waste, IEA Bioenergy, <http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-ask37/Dokumente/managementpaw3.PDF>
- Shailaja, R.,** 2000, Women, Energy and Sustainable Development, *Energy for Sustainable Development*, Volume IV, 1, pp. 45-64
- Sharma, S.K., Mishra, I.M., Sharma, M.P., Saini, J.S.,** 1988, Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomass Residues, *Biomass*, 17, pp. 251-263
- Siddiqui, M.A.,** 1991a, Economic Biogas and Cooling Water Rates in a Lithium Bromide-Water Absorption System, *Int. J. Refrig.*, 14, pp. 32-38
- Siddiqui, M.A.,** 1991b, Optimal Cooling and Heating Performance Coefficients of four Biogas Powered Absorption Systems, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 31, 1, pp. 39-49

KAYNAKLAR (devam)

- Siegert, I., Banks, C.,** 2005, The Effect of Volatile Fatty Acid Additions on The Anaerobic Digestion of Cellulose and Glucose in Batch Reactors, *Process Biochemistry*, 40, pp. 3412–3418
- Siemons, R.V.,** 2002, How European Waste will Contribute to Renewable Energy, *Energy Policy*, 30, pp. 471–475
- Simeonov, I., Queinnec, I.,** 2006, Linearizing Control of The Anaerobic Digestion with Addition of Acetate (Control of The Anaerobic Digestion), *Control Engineering Practice*, 14, pp. 799–810
- Singh, R., Malik, R.K., Jain, M.K., Tauro, P.,** 1984, Biogas Production at Different Solids Concentrations in Daily Fed Cattle Waste Digesters, *Agricultural Wastes*, 11, pp. 253-257
- Singh, R., R.K., Malik, P., Tauro,** 1985, Anaerobic Digestion of Cattle Waste at Various Retention Times: A Pilot Plant Study, *Agricultural Wastes*, 12, pp. 313-316
- Singh, S., Kumar, S., Jain, M.C., Kumar, D.,** 2001, Increased Biogas Production Using Microbial Stimulants, *Bioresource Technology*, 78, pp. 313-316
- Singh, K.J., Sooch, S.S.,** 2004, Comparative Study of Economics of Different Models of Family Size Biogas Plants for State of Punjab, India, *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 1329–1341
- Solera, R., Romero, L.I., Sales, D.,** 2002, The Evolution of Biomass in a Two-phase Anaerobic Treatment Process During Start-up, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 16(1), pp. 25–29

KAYNAKLAR (devam)

- Soylukan, Ş., Akdoğan, F.**, 2001, Kırsal Kesimdeki Küçük Bir Aile İçin Biyogaz Üretim Tesisi, *VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu*, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Ve Çevre Korunumu, 21-24 Haziran 2001
- Spiegel, R.J., Preston, J.L.**, 2000, Test Results for Fuel Cell Operation on Anaerobic Digester Gas, *Journal of Power Sources*, 86, pp. 283-288
- Srinivasan, S.V.**, 1999, Energy from Municipal and Industrial Wastes, Indian Institute of Technology Madras, India, http://www.shaping-the-future.de/pdf_www/107_paper.pdf
- Stafford, D.A., Hawkes, D.L., Horton, R.**, 1981, Methane Production from Waste Organic Matter, CRC Press, Inc., ISBN 0-8493-5223-1, Boca Raton, Florida
- Steffen, R., Szolar, O., Braun, R.**, 1998, Feedstocks for Anaerobic Digestion, AD-NETT
- Sterling Jr., M.C., Lacey, R.E., Engler, C.R., Ricke, S.C.**, 2001, Effects of Ammonia Nitrogen on H₂ and CH₄ Production During Anaerobic Digestion of Dairy Cattle Manure, *Bioresource Technology*, 77, pp. 9-18
- Stern, S.A., Krishnakumar, B., Charati, S.G., Amato, W.S., Friedman, A.A., Fuess, D.J.**, 1998, Performance of a Bench-Scale Membrane Pilot Plant for the Upgrading of Biogas in a Wastewater Treatment Plant, *Journal of Membrane Science*, 151, pp. 63-74
- Strevett, K.A., Vieth, R.F., Grass, D.**, 1995, Chemo-Autotrophic Biogas Purification for Methane Enrichment: Mechanism and Kinetics, *The Chemical Engineering Journal*, 58, pp. 71-79

KAYNAKLAR (devam)

- Strik, D.P.B.T.B., Domnanovich, A.M., Holubar, P.,** 2006, A pH-based Control of Ammonia in Biogas During Anaerobic Digestion of Artificial Pig Manure and Maize Silage, *Process Biochemistry*, 41, pp. 1235–1238
- Stuckey, D.C.,** 1981, Gelişmekte Olan Ülkelerde Isı ve Katkı Maddelerinin Anaerobik Sindirime Etkisi, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 16-40
- Subramanyam, S.,** 1989, Use of Solar Heat to Upgrade Biogas Plant Performance, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 29, 1, pp. 73-75
- Sun, Y., Rahmann, G., Wei, X., Shi, C., Sun, Z., Cong, L.,** 2006, Energy Input and Output of A Rural Village in China - The Case of The "Beijing Man Village"/District of Beijing, *Landbauforschung Völkenrode*, 1/2, 56, pp. 73-83
- Sürmen, Y.,** 2003, The Necessity of Biomass Energy for the Turkish Economy, *Energy Sources*, 25, pp. 83–92
- Tafdrup, S.,** 1995, Viable Energy Production and Waste Recycling from Anaerobic Digestion of Manure and Other Biomass Materials, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 9, 1-5, pp. 303-314
- Taşdemiroğlu, E.,** 1988, Review of the Biogas Technology in Turkey, *Biomass*, 17, pp. 137-148
- Taşdemiroğlu, E.,** 1991, Economics of Biogas Space Heating Systems in Rural Turkey, *Bioresource Technology*, 36, pp. 147-155
- Teixeira, A.A., Chynoweth, D.P., Owens, J.M., Rich, E.R., Dedrick, A.L., Haley, P.J.,** 2004, Prototype Space Mission SEBAC Biological Solid Waste Management System, *34 Internat. Conf. on Environ. Systems (ICES)*, Paper 2004-ICES-098

KAYNAKLAR (devam)

- Tentscher, W.**, 2002, Biogas in the internal market of gas-Compensation for Biogas injected into the Gas Grid- New Possibilities, *12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy*, RAI, Amsterdam
- Tiehm, A., Nickel, K., Neis, U.**, 1997, The Use of Ultrasound to Accelerate The Anaerobic Digestion of Sewage Sludge, *Water Sci. Technol.*, 36(11), pp. 121-128
- Tiwari, G.N.**, 1986, Enhancement in Daily Production of Biogas System, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 26, 3/4, pp. 379-382
- Tiwari, G.N., Chandra, A.**, 1986, A Solar-Assisted Biogas System: A New Approach, *Energy Convers. Mgmt.*, 26, pp. 147-150
- Tiwari, G.N., Yadav, Y.P., Srivastava, A.**, 1987, Optimization of Heat Loss Reduction from the Gas Holder: Analytical Study, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 27, 2, pp. 127-131
- Tiwari, G.N., Rawat, D.K., Chandra, A.**, 1988a, A Simple Analysis of Conventional Biogas Plant, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 28, 1, pp. 1-4
- Tiwari, G.N., Sharma, S.B., Gupta, S.P.**, 1988b, Transient Performance of a Horizontal Floating Gas Holder Type Biogas Plant, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 28, 3, pp. 235-239
- Tiwari, G.N., Chandra, A., Singh, K.K., Sucheta, S., Yadav, Y.P.**, 1989, Studies of KVIC Biogas System Coupled with Flat Plate Collector, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 29, 4, pp. 253-257
- Tiwari, G.N., Singh, S.K., Thakur, K.**, 1992, Design Criteria for an Active Biogas Plant, *Energy*, Vol. 17, 10, pp. 955-958

KAYNAKLAR (devam)

- Tiwari, G.N., Usmani, J.A., Chandra, A.,** 1996, Determination of Period for Biogas Production, *Energy Convers. Mgmt*, Vol.37, 2, pp.199-203
- Tomar, S.S.,** 1995, Status of Biogas Plants in India – An Overview, *Energy for Sustainable Development*, Volume I, 5, pp. 53-56
- Tosun, A., Selçuk, N., Soyupak, S.,** 1986, Samandan Biyogaz Üretimi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, Cilt 9, Sayı 3, ss. 11-17
- Trogisch, S.,** 2001, Quality Function Deployment as a Decision Support Tool for the Sustainable Implementation of AD Facilities, *Energy Marie Curie Fellowship Conference*, Profactor GmbH, Steyr, Austria
- Trogisch, S., Hoffmann, J., Bertrand, L.D.,** 2005, Operation of Molten Carbonate Fuel Cells with Different Biogas Sources: A Challenging Approach for Field Trials, *Journal of Power Sources*, 145, pp. 632–638
- Truong, L.V.-A., Abatzoglou, N.,** 2005, A H₂S Reactive Adsorption Process for The Purification of Biogas Prior to Its Use as A Bioenergy Vector, *Biomass and Bioenergy*, 29, pp. 142–151
- Turkenburg, W.C.,** 2000, World Energy Assessment: Energy And The Challenge of Sustainability, Renewable Energy Technologies-Chapter 7
- Tushar, J., Ghos, D.N.,** 1990, Studies on Residence Time Distribution in Cylindrical and Rectangular Biogas Digesters, *Energy*, Vol. 15, 11, pp. 987-991
- Twidell, J.W., Weir A.D.,** 1986, Renewable Energy Resources, E. & F. Spon, London

KAYNAKLAR (devam)

- Umetsu, K., Yamazaki, S., Kishimoto, T., Takahashi, J., Shibata, Y., Zhang, C., Misaki, T., Hamamoto, O., Ihara, I., Komiyama, M.,** 2006, Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure and Sugar Beets, *International Congress Series*, 1293, pp. 307–310
- Usmani, J.A., Tiwari, G.N., Chandra, A.,** 1996, Performance Characteristic of a Greenhouse Integrated Biogas System, *Energy Convers. Mgmt*, Vol. 37, 9, pp. 1423-1433
- Ülkü, G., Taygun, N.,** 1981, Atıklardan Anaerobik Fermentasyonla Biyogaz Üretimi, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, 23-26 Kasım 1981, Ankara, ss. 209-218
- Van der Zee, F.P., Villaverde, S., Garcí'a, P.A., Fdz.-Polanco, F.,** 2007, Sulfide Removal by Moderate Oxygenation of Anaerobic Sludge Environments, *Bioresource Technology*, 98, pp. 518–524
- Van Die, P.,** 1987, An Assesment of Agriculture Canada's Anaerobic Digestion Program, Agriculture Canada Research Branch, Engineering and Statistical Research Centre, Report 1-933
- Van Herle, J., Mare'chal, F., Leuenberger, S., Favrat, D.,** 2003, Energy Balance Model of a SOFC Cogenerator Operated with Biogas, *Journal of Power Sources*, 118, pp. 375–383
- Vanrolleghem, P.A.,** 1995, Sensors for Anaerobic Digestion: An Overview, *Int. Workshop on Monitoring and Control of Anaerobic Digestion Processes*, Narbonne, pp. 1-7
- Vavilin, V.A., Vasiliev, V.B., Rytov, S.V.,** 1995, Modelling of Gas Pressure Effects on Anaerobic Digestion, *Bioresource Technology*, 52, pp. 25–32

KAYNAKLAR (devam)

- Verma, S.**, 2002, Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Columbia University, <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>
- Vijayalekshmy, M.V.**, 1985, Biogas Technology-an Information Package, Tata Energy Research Institute, Bombay
- Vinnerås, B., Schönning, C., Nordin, A.**, 2006, Identification of The Microbiological Community in Biogas Systems and Evaluation of Microbial Risks from Gas Usage, Science of the Total Environment, 367, pp. 606–615
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D., Koukios, E.G.**, 2001, Assessment of Biomass Potential for Power Production: A GIS Based Method, *Biomass and Bioenergy*, 20, pp. 101-112
- Walsh, J.L., Ross, C.C., Smith, M.S., Harper, S.R.**, 1989, Utilization of Biogas, *Biomass*, 20, pp. 277-290
- Wase, D.A.J., Forster, C.F.**, 1984, Biogas-Fact or Fantasy, *Biomass*, 4, pp. 127-142
- Weiske, A., Vabitsch, A., Olesen, J.E., Schelde, K., Michel, J., Friedrich, R., Kaltschmitt, M.**, 2006, Mitigation of Greenhouse Gas Emissions in European Conventional and Organic Dairy Farming, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, pp. 221–232
- Wenxiu, T., Mengjie, W.**, 1989, Experiment and Research on a Mesophilic Anaerobic Digester with Dairy Cattle Manure in Northern China, *Biomass*, 20, pp. 41-52
- Wereko-Brobby, C.Y., Hagen, E.B.**, 1996, Biomass Conversion and Technology, Chichester : John Wiley & Sons, pp. 76-82

KAYNAKLAR (devam)

- Werner, U., Stöhr, U., Hees, N.,** 1989, Biogas Plants in Animal Husbandry, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH
- Wilkie, A.C.,** 2000a, Anaerobic Digestion: Holistic Bioprocessing of Animal Manures, *Proceedings of the Animal Residuals Management Conference*, pp. 1-12
- Wilkie, A.C.,** 2000b, Reducing Dairy Manure Odor and Producing Energy, *Journal of Composting & Organics Recycling*, BIOCYCLE
- Wilkie, A.C.,** 2003, Anaerobic Digestion of Flushed Dairy Manure, *Anaerobic Digester Technology Applications in Animal Agriculture—A National Summit*, Water Environment Federation, Alexandria, Virginia, p.350-354
- Winfield, R.G.,** 1986, Biogas Production Facilities on Farms - A 1985 Look at the Recent Experience, RR#1, Belmont, Ontario, N0L 1B0
- Winstrom-Olsen, B., Holdom, R.S., Cocker, R., Welborn, R.,** 1977, Energy Analysis of Anaerobic Biogas Fermentation of Agricultural Effluents, *FEMS Microbiology Letters*, 1, pp. 153-156 (BG-265)
- Wright, P.E., Perschke, S.P.,** 1998, Anaerobic Digestion and Wetland Treatment Case Study: Comparing Two Manure Odor Control Systems for Dairy Farms, *ASAE Annual International Meeting*, Orlando, Florida, Presentation Paper No. 984105

KAYNAKLAR (devam)

- Xiaohua, W., Jingfei, L.,** 2005, Influence of Using Household Biogas Digesters on Household Energy Consumption in Rural Areas—A Case Study in Lianshui County in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, pp. 229–236
- Xiaohua, W., Chonglan, D., Xiaoyan, H., Weiming, W., Xiaoping, J., Shangyun, J.,** 2007, The Influence of Using Biogas Digesters on Family Energy Consumption and Its Economic Benefit in Rural Areas—Comparative Study Between Lianshui and Guichi in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, pp. 1018–1024
- Yadav, Y., Tiwari, G.N., Rai, S.N., Chandra, A.,** 1987, An Improved Solar Assisted Biogas Plant: A Transient Analysis, *Energy Convers. Mgmt.*, 27, pp. 153-157
- Yorgun, S., Şensöz, S., Şölener, M.,** 1998, Biyokütle Enerji Potansiyeli ve Değerlendirme Çalışmaları, *Enerji Dergisi*, Ağustos 98, ss. 44–47
- Zupancic, G.D., Ros, M.,** 2003, Heat and Energy Requirements in Thermophilic Anaerobic Sludge Digestion, *Renewable Energy*, 28, pp. 2255–2267
- Zuru, A.A., Dangoggo, S.M., Birnin-Yauri, U.A., Tambuwal, A.D.,** 2004, Adoption of Thermogravimetric Kinetic Models for Kinetic Analysis of Biogas Production, *Renewable Energy*, 29, pp. 97–107

EKLER**EK-1 Faydalı Model Belgesi**

(19) TÜRK PATENT [] ENSTİTÜSÜ

(10) TR 2006 02900 Y

(12) FAYDALI MODEL BELGESİ

(21) Başvuru Numarası
u 2006/02900

(51) Buluşun tasnif sınıfı
G01F 15/04

(22) Başvuru Tarihi
2006/06/08

(43) Başvuru Yayın Tarihi
2006/07/21

(11) Başvuru Yayın No.
TR 2006 02900 U

(45) Faydalı Model Belgesinin Veriliş Tarihi
2007/02/21

(30) Rüçhan Bilgileri (32) (33) (31) (74) Vekil

(71) Faydalı Model Sahipleri

GÖNNUR KOÇAR

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Bornova İZMİR TÜRKİYE

AHMET ERYAŞAR

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Bornova İZMİR TÜRKİYE

(72) Buluşu Yapanlar

GÖNNUR KOÇAR

AHMET ERYAŞAR

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Bornova
İZMİR TÜRKİYE

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Bornova
İZMİR TÜRKİYE

(54) Buluş Başlığı

Biyogaz tesisleri için gaz arıtma işlevli gazometre

(57) Özet

Küçük ve orta ölçekli biyogaz tesislerinde gaz depolama ve arıtma işlevini birlikte gerçekleştirebilmek amacıyla üretilen gazometre, biri biyogazın depolandığı atmosfere kapalı (1), diğeri gaz depolama tankında (1) gazla yer değiştiren suyun depolandığı atmosfere açık (2), birbirine taşıyıcı ayaklar (3) ve bağlantı borusuyla (4) bağlı, iki adet silindirik tanktan oluşmaktadır. Gaz ve suyun yer değiştirme prensibine göre çalışan gazometrenin basıncı, taşıyıcı ayakların (3) yüksekliğiyle ayarlanabilmekte, biyogazın kullanıldığı cihazların gerektirdiği giriş basıncı bu yolla sağlanabilmektedir. Şebekeden (7) ya da su toplama tankından (2) beslenen suyun gaz depolama tankının (1) üzerinde bulunan nozullar (10) vasıtasıyla biyogazın üzerine püskürtülmesiyle karbondioksit (CO₂) giderimi de sağlanmaktadır.

EK-2 50 m³ Kapasiteli Biyogaz Tesisi

SİSTEM TANITIMI

Tesisin Bulunduğu Yer	:Pamukören- Kuyucak/AYDIN
Reaktör Toplam Hacmi	: 60 m ³
Reaktör Çalışma Hacmi	: 50 m ³
Reaktör Çalışma Sıcaklığı	: 37 °C
Besleme Materyali	:% 10 TK Sığır Atığı+Su Karışımı
Hidrolik Bekletme Süresi	: 20 gün
Gazometre Tipi	: Su yer değiştirmeli tip
Gazometre Hacmi	: 40 m ³
Çalışma Basıncı	: 300-700 mbar
Reaktör Isıtması	:Biyogazlı Kombi + Isı Eşanjörü
Karıştırma Tipi	: Hidrolik
Karıştırma Pompası	: Hacimsel Debisi= 35 m ³ /h Basma Yüksekliği= 30 mSS Kauçuk Loblu Pompa

TESİS RESİMLERİ



REAKTÖR VE GAZOMETRE



GAZ REGÜLASYON SİSTEMİ



REAKTÖR ISITMA SİSTEMİ

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Eryaşar 17.09.1967 tarihinde Muğla’da dünyaya geldi. İlk, orta ve lise öğrenimini Muğla’da tamamladı. 1995 yılında İTÜ Makina Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yüksek Lisansını, Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalında yaparak, 1999 yılında mezun oldu. 1991–2005 yılları arasında özel sektörde çalıştı. 2001 yılında, E.Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsünde Enerji Teknolojisinde doktora eğitimine başladı. 2005 yılından itibaren aynı enstitüde uzman olarak çalışmaktadır.