

**BİYOGAZ ÜRETİMİNİN
TEKNİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ**

**TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL
ANALYSIS OF BIOGAS PRODUCTION**

ÖZGE CEREN SABUNCU

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ÇEVRE Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof.Dr.Zümriye AKSU

Üye (Danışman) :.....
Prof.Dr.Ayşenur UĞURLU

Üye :.....
Yrd.Doç.Dr.Ayşegül LATİFOĞLU

Üye :.....
Yrd.Doç.Dr.Merih AYDINALP KÖKSAL

Üye :.....
Dr.Türkay ONACAK

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Adil DENİZLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BİYOĞAZ ÜRETİMİNİN TEKNİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

Özge Ceren Sabuncu

ÖZ

Tüm dünyada fosil yakıtların giderek azalması, maliyetlerinin artması ve sebep oldukları küresel ısınma nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogaza olan ilgi, her geçen gün artmaktadır. Bu çalışma kapsamında çimen, hal-market, mezbaha, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarından biyogaz eldesi amacıyla Kocaeli'nde kurulmakta olan bir anaerobik kofermantasyon tesisi incelenmiştir. Çalışmanın amacı, bu biyogaz tesisinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan analiz edilmesidir.

Çalışmanın ilk bölümünde tesis, teknik olarak değerlendirilmiştir. Tesise kabul edilecek atıklar, kofermantasyon işlemi ile biyogaz üretiminde hammadde olarak kullanılacaktır. Tesiste ayrıca birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminin kullanılmasıyla elektrik ve ısı üretilecektir. Böylece biyogaz tesisi ile insani faaliyetler sonucu oluşan atıklardan hem ekonomik, hem de çevresel fayda sağlanması beklenmektedir. Ayrıca bu atıkların bertaraf edilmeleri için maliyete ve alana ihtiyaç duydukları ve aynı zamanda seragazı emisyonları ile çevresel problemlere neden oldukları bilinmektedir. Tesise ilişkin yapılan ekonomik değerlendirmede tesisin maliyet ve gelir unsurları ile bu verilere istinaden geri ödeme süresi, net şimdiki değer analizi ve iç karlılık analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarla tesisin geri ödeme süresi 8,31 yıl, tesisin net şimdiki değeri pozitif ve iç karlılık oranı da iskonto oranından büyük olarak bulunmuştur. Bu nedenlerle sonuç olarak ekonomik açıdan tesisin yapımının uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca tesisin çevresel analizinde, biyogaz tesisinin kurulması ve kurulmaması halinde oluşan seragazı emisyonları hesaplanarak, biyogaz tesisi kullanımıyla toplam sera gazı azalma miktarı 3.672 tCO₂/yıl olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada atıklardan biyogaz eldesinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan faydaları gösterilmiş ve bir enerji kaynağı olarak biyogazın önemi vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Anaerobik Fermantasyon, Kofermantasyon, Enerji, Ekserji, Ekonomik Analiz, Sera Gazı Emisyonu

Danışman: Prof.Dr. Ayşenur UĞURLU, Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

TECHNICAL, ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF BIOGAS PRODUCTION

Özge Ceren Sabuncu

ABSTRACT

Due to reduction of fossil fuels, increasing of costs and global warming all over the world, the interest of biogas from renewable energy sources increases continuously. In the study an anaerobic cofermentation plant which has been built in Kocaeli for biogas production from grass, vegetable and fruit, inner tripe, cattle manure and chicken manure wastes, is studied. The scope of the study is to make technical, economic and environmental analysis of the biogas plant.

In the first part of the study the biogas plant is determined technically. The wastes accepted in the plant are used as feedstock in cofermentation plant. In the plant the combined heat and power (cogeneration) system is used for production of electricity and heat. In this way with biogas plant, it is expected to have economic and environmental benefits by energy production from wastes that are formed from human activities. Moreover, it is known that those wastes need cost and land for disposal and also cause greenhouse gas emissions and environmental problems. In the economic evaluation the payback period, net present value and internal return rate of the plant was calculated according to the costs and benefits of the plant. As in the calculations the pay back period is found 8,31 years, the net present value is found positive and the internal return rate is found bigger than discount rate. Therefore, as a result it is determined that the plant is economically feasible. Additionally in the environmental analysis of the study the greenhouse gas emissions are calculated for the cases where the plant is used or not and with using the plant total greenhouse gas saving is found 3.672 tCO₂/year.

In this thesis the technical, economic and environmental benefits of biogas production is calculated and the importance of biogas as an energy source is highlighted.

Keywords: Biogas, Anaerobic Fermentation, Cofermantation, Energy, Exergy, Economic Analysis, Greenhouse Gas Emission

Advisor: Prof.Dr. Ayşenur UĞURLU, Hacettepe Üiversity, Department of Environmental Engineering

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez konusunun seçiminden tamamlanmasına kadar her türlü konuda deneyim ve bilgilerini paylaşan ve yol gösteren danışmanım Sn.Prof.Dr.Ayşenur Uğurlu'ya ,

Tez kapsamında değerlendirilen pilot proje ile ilgili teknik bilgileri paylaşan, konu seçiminde destek veren, konu ile ilgili tecrübelerini aktaran ve değerli zamanını ayıran Sn.Doç.Dr.Durmuş Kaya'ya,

Değerli katkılarından ötürü Sn.Prof.Dr.Zümriye Aksu'ya, Sn.Yrd.Doç.Dr.Ayşegül Latifoğlu'na, Sn.Yrd.Doç.Dr.Merih Aydınalp Köksal'a, Sn.Dr.Türkay Onacak'a ve Sn.Öğr.Gör.Dr.Shihomi Ara Aksoy'a,

Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca ders aldığım değerli Çevre Mühendisliği Bölümü Hocalarıma,

Ve dünyanın en şanslı insanı olarak hayatımın her anında, yaşadığım her türlü zorlukta yanımda olan, sevgilerini ve anlayışlarını bir gün bile esirgemeyen canım annem Aysel Sabuncu, babam Tuygun Sabuncu ve kardeşim Murat Sabuncu'ya sonsuz sevgi ve saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Biricik Amcam Hilmi Sabuncu ve Canım Teyzem Nihal Kirazcı'ya...

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. Çalışma Yöntemi ve Planı	2
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Anaerobik Fermantasyon ve Biyogaz	4
2.2. Biyogaz Üretiminin Aşamaları	6
2.2.1. Hidroliz.....	7
2.2.2. Asidojenesis	7
2.2.3. Asetojenesis	8
2.2.4. Metanojenesis.....	8
2.3. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Anaerobik Sistemler	11
2.3.1. Sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler	11
2.3.2. Sürekli beslemeli iki aşamalı sistemler	12
2.3.3. Ardışık kesikli sistemler	13
2.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar ve Kofermantasyon Uygulaması.....	14
2.5. Biyogaz Kullanım ve Uygulama Alanları	20
2.6. Biyogaz Üretimini Etkileyen Temel Parametreler	25
2.6.1. Sıcaklık	26
2.6.2. Hidrolik bekleme süresi.....	28
2.6.3. Organik yükleme hızı	29
2.6.4. pH.....	30
2.6.5. C/N oranı	31
2.6.6. Mikroorganizma konsantrasyonu	32
2.6.7. Karıştırma	32
2.6.8. Işık	33
2.6.9. İz elementler	33
2.6.10. Gaz giderimi.....	33
2.6.11. İnhibitörler	33
2.6.12. Atıkların önarıtımı	34
2.7. Biyogaz Tesislerinin Avantajları ve Dezavantajları	34
2.7.1. Biyogaz tesislerinin avantajları.....	34

2.7.2.	Biyogaz tesislerinin dezavantajları.....	36
2.8.	AB ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyogaz Üretimi	36
2.8.1.	AB’de yenilenebilir enerji kaynakları ve biyogaz üretimi	36
2.8.2.	Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları ve biyogaz üretimi	40
3.	MATERYAL VE METOT	44
3.1.	Proje Bilgileri.....	44
3.2.	Biyogaz Üretiminde Kullanılacak Materyal Tür ve Miktarının Belirlenmesi.....	45
3.3.	Tesis İşletim Parametreleri	46
3.4.	Tesis Birimleri	46
3.4.1.	Atık hazırlama sistemleri.....	46
3.4.2.	Fermantörler (reaktörler).....	47
3.4.3.	Gaz depolama membranı	47
3.4.4.	Organik gübre deposu	48
3.4.5.	Birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) ünitesi	48
3.4.6.	Geri besleme sistemi	49
3.4.7.	Biyogaz tesisi üniteleri ve yerleşim planı	51
3.4.8.	Pilot tesis mevcut durumu.....	51
4.	BİYOGAZ TESİSİNİN TEKNİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ	53
4.1.	Biyogaz Tesisinin Teknik Analizi.....	53
4.1.1.	Biyogaz üretiminin hesabı.....	53
4.1.2.	Birleşik ısı ve güç sisteminin verim hesapları	56
4.1.2.1.	Tesisin enerji-ekserji verimi için kullanılan veriler	57
4.1.2.2.	Toplam enerji verimi	58
4.1.2.3.	Net enerji verimi.....	59
4.1.2.4.	Güç ve ısı üretim verimleri	59
4.1.2.5.	Güç/ısı oranı	60
4.1.2.6.	Toplam ekserji verimi.....	61
4.1.2.7.	Net ekserji verimi	62
4.1.2.8.	Elektrik ve ısı birliktelikte ve ayrı ayrı üretimi.....	62
4.1.2.9.	Referans sistemin elektrik ve ısı enerjisi.....	63
4.1.2.10.	Birincil enerji tasarrufu	64
4.1.2.11.	Bağıl birincil enerji tasarrufu	64
4.2.	Biyogaz Tesisinin Ekonomik Analizi	65

4.2.1.	Tesis maliyetini oluşturan unsurlar.....	67
4.2.1.1.	Proje tasarım giderleri ve ilk yatırım maliyeti	67
4.2.1.2.	Tesis işletme giderleri	67
4.2.1.2.1.	Fermantörün kullanımı ve bakımı	68
4.2.1.2.2.	Birleşik ısı ve güç sisteminin kullanımı ve bakımı	68
4.2.1.2.3.	İş gücü	68
4.2.1.2.4.	Sigorta ve vergiler	69
4.2.2.	Tesis gelirlerini oluşturan unsurlar	69
4.2.2.1.	Elektrik satışı	70
4.2.2.2.	Isı satışı	70
4.2.2.3.	Organik gübre satışı	70
4.2.2.4.	Yeşil sertifika satışı	71
4.2.3.	Tesisten elde edilen yıllık kar.....	72
4.2.4.	Proje ekonomik değerlendirme ölçütlerinin belirlenmesi	74
4.2.4.1.	Tesis geri ödeme süresi.....	75
4.2.4.2.	Net bugünkü değer analizi	76
4.2.4.3.	İç karlılık oranı analizi	81
4.3.	Biyogaz Tesisinin Çevresel Analizi.....	83
4.3.1.	Net sera gazı üretimi hesabı	84
4.3.1.1.	Tesisin mevcut olmaması halinde oluşan sera gazı emisyonları	85
4.3.1.2.	Tesisin mevcut olması halinde oluşan sera gazı emisyonları	92
4.3.2.	Sera gazındaki azalma hesabı.....	95
5.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	99
5.1.	Genel Sonuçlar	99
5.2.	Öneriler.....	101
	KAYNAKLAR DİZİNİ	104
	EKLER DİZİNİ	111
	ÖZGEÇMİŞ.....	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Biyogaz üretim aşamaları.....	10
Şekil 2.2. Tarımsal tesislerde komateryal kullanımının biyogaz verimine etkisi	18
Şekil 2.3. Birleşik ısı ve güç santralının şematik görünüşü.....	22
Şekil 2.4. Türkiye’de birleşik ısı ve güç sistemlerinin kullanıldığı alanlar.....	24
Şekil 2.5. Biyogaz sisteminde materyal ve enerji akış diyagramı.....	25
Şekil 2.6. AB enerji kaynakları kullanımı.....	38
Şekil 2.7. Türkiye genel enerji tüketimi dağılımı.....	40
Şekil 3.1. Biyogaz tesisi üniteleri.....	51
Şekil 3.2. Tesis yerleşim planı.....	52
Şekil 3.3. Tesis temel kazı ve inşaat çalışmaları.....	52
Şekil 4.1. Sıcaklık ve bekleme süresine bağlı gaz üretimi (fT, RT) eğrisi.....	55
Şekil 4.2. Isı ve elektrik üretim şemaları.....	62
Şekil 4.3. Ekonomik analize esas atık yönetim modeli.....	66
Şekil 4.4. Biyogaz tesisinin gelir ve giderlerinin bugünkü değerlerinin dağılımı ..	80
Şekil 4.5. Hesaplanan tesis nakit akışı ve net bugünkü değerleri.....	81
Şekil 4.6. Biyogaz tesisinin İKO ve NBD değişimleri.....	83
Şekil 4.7. Senaryo 1 ve 2’ye göre biyogaz tesisinin olmaması halinde atık bertarafı.....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Organik maddelerden biyogaz eldesi ve metan içeriği.....	5
Çizelge 2.2. Biyogazın bileşenler.....	6
Çizelge 2.3. Atıklardan ortalama biyogaz üretim miktarları.....	16
Çizelge 2.4. Farklı organik atıkların yapıları ve enerji üretimi.....	17
Çizelge 2.5. Farklı organik materyal ilavelerinin gaz üretim verimine etkisi.....	19
Çizelge 2.6. Anaerobik fermantasyon çevresel gereklilikleri.....	26
Çizelge 2.7. AB ülkeler bazında biyogaz birincil enerji.....	39
Çizelge 2.8. Bölgesel bazda kullanılabilir tarımsal kaynaklı atık miktarları.....	42
Çizelge 2.9. Türkiye'nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz üretimi.....	42
Çizelge 3.1. Biyogaz tesisinde kullanılacak atık tür ve miktarları.....	45
Çizelge 3.2. Tesiste kullanılacak atıkların özellikleri.....	46
Çizelge 3.3. Tesis optimum çalışma koşulları.....	46
Çizelge 3.4. Tek katlı gaz depolama membran boyutları.....	48
Çizelge 3.5. Biyogaz tesisi ünite ve kapasite bilgileri.....	50
Çizelge 4.1. Atık türlerine göre ortalama biyogaz üretim miktarları.....	53
Çizelge 4.2. Atıklardan üretilen biyogaz miktarları.....	56
Çizelge 4.3. Tesis enerji verileri.....	58
Çizelge 4.4. Ekonomik analize esas teknik veriler.....	66
Çizelge 4.5. Tesisin hesaplanan gelir gider dağılımı.....	73
Çizelge 4.6. Tesisin hesaplanan net gelir dağılımı.....	74
Çizelge 4.7. Projenin brüt gelir, gider ve net gelirlerinin bugünkü değerleri.....	79
Çizelge 4.8. İç karlılık oranlarına göre hesaplanan net bugünkü değerler.....	82
Çizelge 4.9. Senaryo 1 ve 2'ye göre hesaplanan CO ₂ emisyonları.....	90

Çizelge 4.10. Tesisin mevcut olmaması halinde oluşan seragazı emisyonları.....	91
Çizelge 4.11. Tesisin mevcut olması halinde hesaplanan sera gazı emisyonları.....	94
Çizelge 4.12. 2008 yılı Türkiye elektrik üretiminde kullanılan fosil kaynaklı yakıtlar ve oluşan emisyon miktarları.....	95
Çizelge 4.13. Tesisin sera gazı analizi özeti.....	98
Çizelge 4.14. Biyogaz üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel analiz özeti....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AB	Avrupa Birliği
AB-27	Avrupa Birliğine üye 27 ÷lke
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BIG	Birleşik Isı ve G÷ç
C	Karbon
CH ₄	Metan
Co	Kobalt
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
E _F	Giren enerjinin ekserjisi
E _Q	Isı enerjisinin ekserjisi
Fe	Demir
f(T,RT)	Reaktör sıcaklık ve bekleme süresine bağlı gaz üretim çarpanı
G _Y	Günlük üretilen biyogaz miktarı
G(T,RT)	Bekleme süresi ve sıcaklığa göre düzeltilmiş biyogaz üretim miktarı
GÖS	Geri ödeme süresi
GW	Gigawatt
H	Hammadde eşdeğeri toplam enerji
H ₂ S	Hidrojen sülfür
H _{el,ref}	referans sisteme giren elektrik enerjisi
H _{Q,ref}	referans sisteme giren ısı enerjisi
İKO	İç karlılık oranı
İZAYDAŞ	İzmit Atık ve Artıkları Arıtma Yakma ve Değerlendirme A.Ş.
KM	Kuru madde
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
kW	Kilowatt

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ-devam ediyor

mGy	Uçucu katı madde başına ortalama spesifik gaz üretim miktarı
Mo	Molibden
Mg	Magnezyum
MJ	Megajoule
Mt	Milyon ton
Mtep	Milyon ton eşdeğer petrol
MW	Megawatt
N	Azot
N ₂	Azot gazı
NH ₃	Amonyak
NH ₄	Amonyum
Ni	Nikel
NO ₃	Nitrat
NBD	Net bugünkü değer
OKM	Organik kuru madde
P	Fosfor
P _e	Elektriksel güç
PES	Birincil enerji tasarrufu
Q	Isı enerjisi
RPES	Bağıl birincil enerji tasarrufu
S	Kükürt
Se	Selenyum
Tep	Ton eşdeğer petrol
TÜBİTAK MAM	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi
W	Elektrik enerjisi
W	Tungsten

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ-devam ediyor

W_c	Tesis elektrik sarfiyatı
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
α_F	Giren enerjinin ekserji-enerji oranı
α_Q :	Isı enerjisinin ekserji-enerji oranı
η_{el}	Elektrik verimi %'si
$\eta_{el,ref}$	Referans tesisin elektrik verimi %'si
η_{ex}	Toplam ekserji verimi %'si
η_{exnet}	Net ekserji verimi %'si
η_{net}	Net enerji verimi %'si
η_Q	Isı verimi %'si
$\eta_{Q,ref}$	Referans tesisin ısı verimi %'si
η_{tot}	Toplam enerji verimi %'si
σ	Elektrik/Isı oranı

1. GİRİŞ

Günümüzde yönetimi ve denetimi giderek önem kazanan enerji, kalkınmışlığın ve gelişmişliğin bir ölçütü olarak kabul edilmekte ve ülkelerin gelişmişliği kişi başına düşen enerji miktarı ile ölçülmektedir. Son yıllarda artan nüfusa bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç da artış göstermektedir. Teknolojideki son gelişmeler ve fosil yakıt kaynaklarının her geçen gün azalması ile, enerji temininde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil kaynaklara alternatif olarak kullanılabilen, doğal ortamda varolan enerji akışından elde edilen enerjidir. En önemli yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgar, su, jeotermal, biyokütle ve biyogaz olarak sıralanabilir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Yenilenebilir kaynaklara olan ilk ilgi, fosil yakıtların yanması sonucu salınan toksik maddeler, azot ve sülfüroksit bileşikleri nedeniyle oluşmuştur. Bu hava kirleticileri başta asit yağmurları olmak üzere, özellikle insani faaliyetler sonucu oluşan karbondioksit ve diğer atmosferik kirleticilerin artması ile küresel ısınmaya neden olmaktadır. 70'li yıllarda ABD ve diğer gelişmiş ülkelerde yaşanan enerji krizinden sonra, fosil kaynakların yakın gelecekte tükeneceği gözönüne alınarak, enerji tüketimlerinin kontrol altına alınması ve azaltılması gereği gündeme gelmiş, bu amaçla da yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır (Chynoweth et al., 2001).

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogaz, çevreye olan uyumları nedeni ile merak ve ilgi konusu haline gelirken; çevresel sorunlar yaratan evsel, endüstriyel ve tarımsal organik atıkların işlenerek zararsız hale getirilmesinde ve enerji eldesinde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır.

Türkiye'de tarım ve hayvancılığın önemli geçim kaynakları arasında yer alması, biyogaz eldesinde kullanılacak hammaddelerin de doğrudan üretildiği anlamındadır. Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan atıklar da bu hammaddelerde artış sağlamaktadır.

Günümüzde dünyada işletilen pek çok biyogaz tesisi mevcut olup biyogaz konusu ile ilgili bilimsel çalışmalar sürdürülmekte ve sistem verimini arttırmak ve yüksek oranda enerji elde edebilmek için gerekli sistem boyutlandırması ve hammadde

beslemeleri ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Bu konuda özellikle farklı materyallerin birlikte kullanıldığı kofermantasyon prosesi ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmektedir (Bouallagui et al., 2009).

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı; biyogaz üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel analizlerinin yapılmasıdır.

Bu amaçla biyogaz konusunda Türkiye’de geliştirilen ilk büyük ölçekli ve farklı atık türlerinin birlikte kullanımının (kofermantasyon) denendiği proje olma özelliğini taşıyan, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi önderliğinde İZAYDAŞ bünyesinde gerçekleştirilen Tübitak Pilot Biyogaz Santrali, pilot proje olarak ele alınmıştır.

1.2. Çalışma Yöntemi ve Planı

Bu çalışmada incelenen başlıca konular, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Öncelikle belirlenen çimen, hal-market, mezbaha, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarından elde edilebilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Tesisi oluşturan ünite ve ekipmanlarla ilgili bilgiler verilerek, tesiste kullanılan birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminden elde edilebilecek birincil enerji tasarrufu hesaplanmıştır. Böylece tesis teknik analizi yapılmıştır.

Tesisin ilk yatırım maliyeti, işletme gelirleri ve giderleri ayrı ayrı hesaplanarak, ekonomik yaklaşımla bir atık yönetim modeli oluşturulmuştur. Bu modele göre biyogaz tesisinin tüm girdi ve çıktıları belirlenmiştir. Tesisin geri ödeme süresi, net bugünkü değer analizi ve iç karlılık oranı hesaplanarak, biyogaz üretiminden elde edilebilecek ekonomik faydalar belirlenmiştir.

Yatırımların değerlendirilmesinde projelerin çevresel etkileri de gözönünde bulundurulması gereken önemli bir unsurdur. Atıklardan kaynaklanan en önemli sorunlardan biri doğal ortamda neden oldukları sera gazı emisyonları olduğundan, biyogaz üretiminin çevresel analizinde oluşturulan senaryolarla sera gazı emisyonları incelenmiştir.

Sunulan tez çalışması beş ana başlık altında toplanmıştır. Birinci bölümde çalışmanın amacına yer verilerek, yöntem ve planı anlatılmıştır. Çalışmanın ikinci

bölümü, konu ile ilgili literatür bilgilerinin yer aldığı genel bilgilerden oluşmaktadır. Bu bölümde özellikle farklı atıkların kofermantasyon ile değerlendirilmeleri ve biyogaz santralinde birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminin kullanımı detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümü olan materyal ve metot bölümünde proje bilgileri ve tesiste kullanılacak materyal tür ve miktarları derlenmiş, tesiste kullanılan ünite ve ekipmanlar ile ilgili bilgi verilmiş ve tesis yerleşim planı incelenmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde biyogaz üretimi teknik, ekonomik ve çevresel açıdan incelenmiştir. Bunun için teknik analiz bölümünde öncelikle kullanılan atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarları hesabı yapılmış, ayrıca tesiste kullanılan birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminin verim değerlendirilmesini içeren enerji ve ekserji analizlerine de yer verilmiştir. Aynı bölümde yer alan ekonomik analizde biyogaz tesisinin verileri gözönüne alınarak bir atık yönetim modeli tanımlanmış ve bu modele istinaden projenin girdileri ve çıktıları belirlenerek tesisin maliyet bileşenleri ve gelir bileşenleri saptanmıştır. Tesisin ilk yatırım ve işletme maliyetleri detaylı olarak hesaplanmış, geri ödeme süresi, net şimdiki değer analizi ve iç karlılık oranı analizi ile tesisin ekonomik analizi yapılmıştır. Bu bölümde ayrıca tesis sera gazı değerlendirmesinin yer aldığı çevresel analize yer verilmiştir. Çevresel analiz kapsamında, tesisin mevcut olması halinde oluşan sera gazı emisyon miktarları, tesisin olmaması halinde atıkların bertarafı sonucu oluşan emisyonlarla karşılaştırılmıştır. Böylece tesis net sera gazı üretimi ve sera gazındaki azalma hesaplanarak, tesisten sağlanacak çevresel fayda belirlenmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar derlenerek yorumlanmış ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

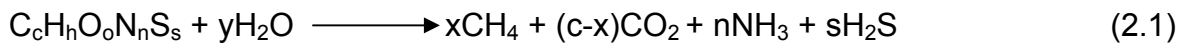
2.1. Anaerobik Fermantasyon ve Biyogaz

Kentsel, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan organik içerikli atıklar, pek çok ekonomik ve çevresel soruna neden olmaktadır. Organik atıklar, genel olarak etkin bir dönüşüm işleminden geçirilmeden doğaya atılmakta, depolanmakta, yakılmakta veya verimsiz bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar sonucunda kirliliklerin tamamen bozunması sağlanamamakta ve ülke ekonomisi için girdi değeri taşıyan bu ürünler, çevre, ekosistemler ve insan sağlığı için tehdit unsuru haline dönüşmektedir. Atıkların kontrolsüz depolanması ve ayrışması, CH₄ ve CO₂ salınımlarına ve dolayısıyla küresel ısınmaya neden olmaktadır. Buna ek olarak depolamada koku, sinek ve patojen oluşumu ile hijyen şartları bozulmaktadır. Ayrıca oluşan nitrat birikimi, toprak yapısının ve mikrobiyolojisinin bozulmasına, nitratın yüzey ve yeraltı sularına karışması ile ötrofikasyona, sebze-meyve tüketimi ve içmesuyu yoluyla da insan ve diğer canlı yaşamını tehdit etmesine neden olmaktadır (Yu et al., 2002).

Organik atıkların gideriminde en etkili ve aynı zamanda enerji sağlayan yöntemlerden biri anaerobik fermantasyon (havasız çürütme) yöntemidir (Taleghani and Kia, 2005; Bouallagui et al., 2009). Anaerobik fermantasyon, organik atıkların oksijensiz ortamda bakterilerce bozunmasıdır. Bu bozunma sırasında pek çok farklı türde bakteri görev alır ve bozunma sonucunda bir gaz karışımı olan biyogaz ile sıvı ve katı kısımdan oluşan fermente atık meydana gelir (Chynoweth et al., 2001). Bozunma ile elde edilen enerjinin %10-12'si yeni hücrelerin üretiminde kullanılmakta olup, biyolojik olarak çözünebilir organik maddelerin %85-90'ı biyogaz ve son ürünlere dönüştürülür (McCarty, 1964).

Organik atıkların biyogaz üretim teknolojisi kullanılarak yaşam ve üretim döngüsü içerisine dahil edilmeleri sürdürülebilir bir çözümdür.

Organik atıklardan biyogaz oluşumu, aşağıdaki Buswell eşitliği ile meydana gelir (Deublein, and Steinhauser, 2008):



Burada;

$$x = 1/8*(4c+h-2o-3n+2s) \quad (2.2)$$

$$y = 1/4*(4c-h-2o+3n+2s) \quad (2.3)$$

olarak hesaplanır.

Biyogaz eldesinde yaygın olarak kullanılan organik maddeler karbonhidratlar ($C_6H_{12}O_6$), yağlar ($C_{16}H_{32}O_2$) ve proteinlerdir ($C_6H_{10}O_2$) (Deublein and Steinhauser, 2008). Biyogaz eldesinde en fazla gaz elde edilebilen atıklar, yağ içerikli atıklardır. Bunun nedeni yağın, organik kuru madde ve enerji içeriğinin çok yüksek olmasıdır. Karbonhidratlardan, proteinlerden ve yağlardan elde edilebilecek ortalama gaz üretim miktarları ve metan içerikleri Çizelge 2.1'de ifade edilmiştir. Buna göre organik kuru madde (OKM) başına üretilen ortalama biyogaz; karbonhidratlardan 800 l/kgOKM, yağlardan 1.250 l/kgOKM ve proteinlerden ise 700 l/kgOKM civarındadır (Werner et al., 1989; Seadi et al., 2008).

Çizelge 2.1. Organik maddelerden biyogaz eldesi ve metan içeriği (Werner et al., 1989; Seadi et al., 2008)

Materyal	Biyogaz Üretimi (l/kgOKM)	CH ₄ İçeriği (%)	CO ₂ İçeriği (%)
Karbonhidratlar	790	50	50
Yağlar	1.250	68	32
Proteinler	700	71	29

Biyogaz, organik atıkların oksijensiz ortamda fermantasyonu sonucu açığa çıkan, renksiz, kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan, yanıcı, patlayıcı, kolay kontrol edilebilen, ağırlıklı olarak metan ve karbondioksitten oluşan bir gaz karışımıdır (Igoni et al., 2008)

Biyogazın bileşimi; besleme tipi, kullanılan çürütücü sistemi, sıcaklık ve bekleme süresi gibi faktörlere bağlı olmakla birlikte literatürde yer alan biyogaz yapısını oluşturan bileşenler ve ortalama miktarları Çizelge 2.2'de yer almaktadır.

Anaerobik fermantasyon ile oluşan biyogazın enerji içeriği, metan miktarına bağlıdır. Yaklaşık %55 oranında metan içeren biyogazın ısı değeri 21 MJ/Nm³ olup, yoğunluğu 1,22 kg/Nm³'tür (Igoni et al., 2008).

Çizelge 2.2. Biyogazın bileşenleri (Igoni et al., 2008)

Bileşen	Miktar (%)
Metan (CH ₄)	55-75
Karbondioksit (CO ₂)	30-45
Hidrojen sülfür (H ₂ S)	1-2
Azot (N ₂)	0-1
Hidrojen (H ₂)	0-1
Karbonmonoksit (CO)	eser miktarda
Oksijen (O ₂)	eser miktarda

Biyogaz içindeki CO₂'in CH₄'e oranı organik hammaddedeki bozunma oranı ile belirlenir. Atıklardan kazanılan biyogaz hacmi ise aşağıdaki faktörlere göre oluşur (Deublein and Steinhauser, 2008).

- Organik kütledeki yüksek enerji içeren malzemenin parçalanması,
- Giren kuru biyokatıdaki organik kuru madde içeriği,
- Substratın kuru madde içeriği,
- Biyogazın metan içeriği,
- Biyogaz tesisinin gerçek parçalanma derecesi

2.2. Biyogaz Üretiminin Aşamaları

Biyogaz üretimi, farklı mikroorganizma gruplarının rol aldığı oldukça karmaşık bir biyokimyasal süreçtir. Oksijene karşı hassas olan veya oksijen varlığında tamamen inhibe olan bu bakteri grubu, organik maddeleri biyolojik yollarla CH₄ ve CO₂'ye dönüştürür. Metan fermantasyonu olarak da adlandırılan bu reaksiyonlar zinciri, aşağıda belirtilen 4 aşamadan oluşur (Werner et al., 1989; Deublein and Steinhauser, 2008).

1. Büyük moleküllü organik maddelerin, daha küçük moleküllü organik maddelere dönüşümü (hidroliz),
2. Küçük moleküllü organik maddelerin asit bakterileri tarafından uçucu yağ asitlerine dönüşümü, asit oluşumu (asidojenesis),
3. Uçucu yağ asitlerinin asetik asit, hidrojen ve karbondioksite dönüşümü, asit oluşumu (asetojenesis),

4. H₂, asetat ve CO₂'nin metan bakterileri tarafından metana dönüşümü, metan oluşumu (metanojenesi)

Her bir faz birbirinden farklı mikroorganizma grupları tarafından, farklı çevresel ihtiyaçlarla gerçekleşir. Biyoreaksiyonlarda tanımlanan 4 faz birbirine bağımlıdır.

2.2.1. Hidroliz

Hidroliz aşamasında karmaşık yapıları organik moleküller, mikroorganizmaların hücre dışı enzimleri ile hücre duvarından geçebilecek kadar küçük ve daha basit yapıda çözünür haldeki moleküllere dönüşür. Bu aşamada selüloz, lignin ve hemiselüloz gibi karbonhidratlar glikoz, pentoz ve heksoza; proteinler polipeptid ve aminoasitlere; yağlar da alkol, yağ asidi ve hidrojene dönüşür (Speece, 1996). Bu sayede, uzun zincirli karmaşık bileşikler, kısa zincirli yapıya dönüştürülür.

Karbonhidratların hidrolizi birkaç saatte gerçekleşirken, protein ve lipidlerin hidrolizi birkaç günde gerçekleşir. Bazı lifli organik maddeler ise çözünür hale dönüştürülemez. Dolayısıyla bu maddeler reaktörde birikebilir veya reaktörden bozunmadan çıkabilir. Selüloz ve lignin gibi kompleks maddelerin hidrolize olmaları çok yavaştır ve genellikle bozunma tamamlanmaz (Deublein and Steinhauser, 2008).

Hidroliz fazı çok hızlı gerçekleşirse, biyogazdaki CO₂ miktarı artar, asit konsantrasyonu yükselir ve pH değeri 7'nin altına düşer. Bu da çalışma koşullarını olumsuz etkileyen, istenmeyen bir durumdur (Deublein and Steinhauser, 2008).

Hidroliz oranı; pH, sıcaklık, kullanılan atığın yapısı ve partikül büyüklüğü gibi faktörlerin bir fonksiyonudur (Bouallagui et al., 2005).

2.2.2. Asidojenesi

Hidroliz aşamasında oluşan çözünmüş bileşikler, asidojen bakterileri tarafından kısa zincirli organik yağ asitlerine dönüştürülür. Bu aşamada çözünmüş karbonhidratlar etanol, H₂ ve CO₂'ye; aminoasitler süksinik asit ve H₂'ye; yağ asitleri ise asetat ve H₂'ye indirgenir (Speece, 1996). Hızla gelişen hidrojen iyonlarının konsantrasyonu, fermantasyon ürünlerini etkiler. Hidrojenin kısmi basıncı ne kadar yüksek olursa, o kadar az indirgenmiş bileşik oluşur.

Asidojenesis fazının hızı metan üretimini etkilediğinden, düşük metan üretimine neden olan yüksek hızlardan kaçınılmalıdır.

2.2.3. Asetojenesis

Asetojenesiste, asidojenik fazda oluşan ürünler, asetojenik faz bakterilerince substrat olarak kullanılır. Asetojenik bakteriler oligotör H₂ üreticileridir. Yaşamaları ve büyümeleri için gerekli olan enerjiyi, çok düşük H₂ konsantrasyonlarında alırlar (Deublein and Steinhauser, 2008).

Bu fazda, asidojenesisde oluşan asetik asit dışındaki diğer uçucu yağ asitleri asetik asit, hidrojen ve karbondioksite dönüştürülür (Yu et al., 2002).

Asit üretiminin temsili reaksiyonu aşağıdaki gibidir (Themelis and Ulloa, 2007):



Asetojenik faz, final aşamasında indirgenme oranını limitler. Bu bakterilerin aktivasyonu, biyogazın kalite ve içeriğini etkiler.

Asidojenik ve asetojenik faz, genel olarak birlikte asit üretim fazı olarak değerlendirilir (Deublein, and Steinhauser, 2008). Her iki fazın genelinde çözünebilir hale dönüşmüş organik maddeler bakterilerce asetik asit başta olmak üzere uçucu yağ asitleri, H₂ ve CO₂ gibi daha küçük yapıdaki maddelere dönüştürülür. Bu bakteriler anaerobiktir. Asidik şartlarda büyürler. Büyümeleri ve çoğalmaları için ihtiyaç duydukları oksijeni çözüntüdeki bağlı halde bulunan oksijenden sağlarlar. Asit oluşturucu bakteriler metan oluşturucu bakteriler için anaerobik şartlar oluştururlar. Asit üretim hızı metan üretim hızına göre daha yüksektir. Organik madde konsantrasyonundaki ani artışlar asit üretiminin artmasına ve pH düşmesine neden olur. Bu da metan bakterileri üzerinde inhibisyon etkisi yapar (Deublein and Steinhauser, 2008).

2.2.4. Metanojenesis

Metan fermantasyonu yüksek anaerobik şartlar altında gerçekleşir.

Metanojenesis aşamasında, asetojenesis aşamasında oluşan organik asitler, H₂ ve asetat; asetik asitin parçalanması ve/veya hidrojen ile karbondioksitin sentezlenmesi ile metanojen mikroorganizmalar tarafından CH₄ ve CO₂'e

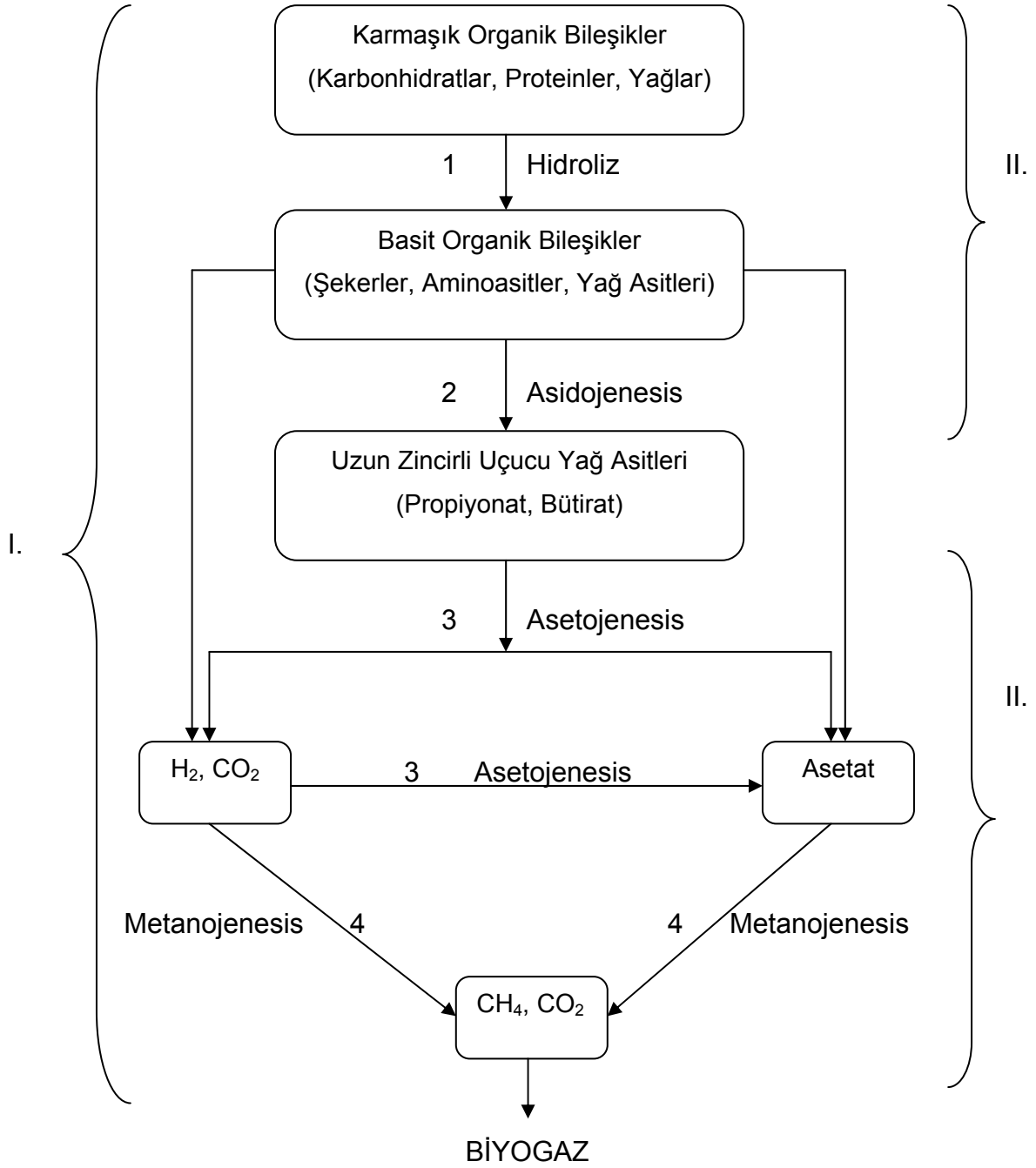
dönüştürülmekte ve böylece biyogaz üretilmektedir. Üretilen metanın yaklaşık %30'u hidrojen gazı ile karbondioksit gazından, %70'i ise asetik asit'in parçalanmasından oluşur. Tüm uçucu organik asitler ve çözünen organik bileşikler biyogaza dönüşmez. Bazı organik maddeler arıtılmadan deşarj olur (Deublein and Steinhauser, 2008).

Metan üretiminin temsili reaksiyonu aşağıdaki gibidir (Gerardi, 2003; Themelis and Ulloa, 2007):



Metan üretim süreci yavaştır. Anaerobik arıtmada hız sınırlayıcı safha olarak kabul edilmektedir. Metan oluşturucu bakteriler, asidojenik ve asetojenik bakterilerin aksine çevresel şartlara karşı çok hassastırlar. Metan oluşumunun zarar görmesi, sistemde aşırı asit oluşumuna neden olabilir.

Biyogaz üretiminin aşamaları Şekil 2.1'te gösterilmiştir:



I: Tek aşamalı sistem, II: İki aşamalı sistem

Şekil 2.1. Biyogaz üretim aşamaları (Gerardi, 2003; Bouallagui et al., 2005).

2.3. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Anaerobik Sistemler

Biyogaz üretiminde kullanılan sistemler, tesisin kurulacağı bölgenin yerel şartlarına, atık envanterine ve istenen kapasiteye göre farklılık gösterir. Biyogaz sistemleri seçilirken gözönünde bulundurulması gereken değişmez özellikler şöyle sıralanabilir (Bouallagui et al., 2005; Deublein and Steinhauser, 2008).

- Atıklar olabildiğince uygun koşullarda ve ekonomik olarak tesise taşınmalıdır,
- Tesis atık yükleme reçeteleri hazırlanırken bölgesel atık kaynakları itinalı bir şekilde belirlenmelidir,
- Fermantasyon sıcaklığı bölge iklim koşullarına göre, tesis bekleme süresi ise atık yükleme miktarına göre seçilmelidir,
- Tesis kapasitesi belirlenirken, atıkların ve oluşan fermante atıkların depolanabilecek miktarları gözönünde bulundurulmalıdır.
- Seçilen tesis teknolojisi teknik olarak bölgeye uyumlu olmalıdır.

Anaerobik fermantasyon ile biyogaz üretiminde yaygın olarak kullanılan reaktör tipleri, sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler, sürekli beslemeli iki aşamalı sistemler ve ardışık kesikli sistemlerdir (Vandevivere et al., 2003; Bouallagui et al., 2005).

2.3.1. Sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler

Tek aşamalı sistemlerde asit ve metan oluşumu aynı reaktör içinde gerçekleşir. Asidojenik bakterilerce oluşturulan hidrojen, metanojenik bakterilerce metan ve su oluşturmak üzere kullanılır. Atık beslemesindeki artış, asidojenik aktiviteyi ve dolayısıyla asetat, karbondioksit ve hidrojen üretimini artırır. Ancak metanojenik bakteriler, aktivitelerini aynı oranda arttıramazlar. Bu da sistem dengesinin bozulmasına ve metan üretiminin durmasına neden olabilir (Bouallagui et al., 2005).

Özellikle iki aşamalı sistemlere göre basit tasarımları ve düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle tercih edilirler. Pek çok organik atık için reaktör tasarımı doğru yapıldığında ve işletme şartları dikkatli seçildiğinde, biyolojik performansları iki ve çok aşamalı sistemlerle aynı düzeydedir (Vandevivere et al., 2003).

Bu sistemlerde katı atıkların fermantasyonunda atığın kolay bozunabilir olması fermantörde tutulamama sorununu yaratabilir (Vandevivere et al., 2003).

Asit ve metan oluşumunun aynı biyolojik şartlarda gerçekleşmesi sırasında, uçucu yağ asitlerinin üretim hızı, bu asitlerin metana dönüşme hızından daha hızlı gerçekleşir. Bu durum, reaktörde asit birikimine, böylece pH'ın düşmesine, fazla miktarda uçucu yağ asitlerinin oluşumuna ve metanojenesis aşamasının inhibe olmasına neden olabilir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Tek aşamalı sistemlerde fermantasyon uygulaması ıslak ve kuru olarak gerçekleşebilir. İki teknolojiyi birbirinden ayıran özellik, kullanılan atıkların nem içeriğidir (Vandevivere et al., 2003). Atıkların nem içeriğine bağlı olarak seçilen teknolojiye göre, farklı nakliye, karıştırma ve ön arıtma işlemleri gerekebilir.

Islak fermantasyonda inhibe edici malzemeler taze su ile seyreltilerek etkileri giderilebilir. Atıkların taşınması daha ucuzdur ancak daha karmaşık ön arıtma işlemleri gerektirirler. Fazla miktarda su tüketimlerinin yanı sıra, büyük reaktör hacimlerinden dolayı daha fazla enerji tüketimleri vardır (Vandevivere et al., 2003).

Kuru fermantasyonda ise daha küçük çaplı reaktörler gereklidir ve dolayısıyla daha az enerji ve su tüketimi söz konusudur. İnhibe edici maddelerin etkisi daha fazladır ve ıslak atıklar yalnız olarak kullanılamazlar (Vandevivere et al., 2003).

Pek çok endüstriyel uygulamada iki aşamalı sistemler yerine, atıkların karıştırılması, kontrollü beslenmesi ve eğer mümkünse farklı atıkların birbiri ile karıştırılarak kullanılmasıyla (kofermantasyon) geliştirilen tek aşamalı sistemler tercih edilmektedir (Vandevivere et al., 2003). Anaerobik fermantasyonda, Avrupa'daki büyük ölçekli tesislerin %90'ında sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler kullanılmaktadır (Lissens et al., 2001).

2.3.2. Sürekli beslemeli iki aşamalı sistemler

İki aşamalı sistemlerde asit ve metan oluşumu ayrı reaktörlerde gerçekleşir. Katı faz reaktörü olarak da anılan asit fazı reaktörü ilk reaktör olup, bu reaktörde hidroliz ve asidojenesis aşamaları gerçekleşirken, metan fazı reaktörü olarak anılan ikinci reaktörde metanojenesis aşaması gerçekleşir (Yu et al., 2002).

Asit ve metan üreten bakterilerin nütrient ihtiyaçları, fizyolojileri, büyüme kinetikleri, uygun pH değerleri ve çevresel stres faktörleri birbirinden farklıdır. Tek aşamalı sistemlerde bu şartlar, her iki bakteri türü için uygun hale getirilir. İki aşamalı sistemlerde ise bu şartlar her bir bakteri türü için ayrı reaktör ortamlarında hazırlanır (Vandevivere et al., 2003).

Yapılan çalışmalarda faz ayrımı tasarlanan projelerde, bozunma oranı ve biyogaz üretiminde daha yüksek verim elde edildiği gözlenmiştir (Bouallagui et al., 2005). İki aşamalı sistemlerde çok az su tüketilir ve bu su, asit fazı ve metan fazı arasında devirdaim eder. Bekleme süresi, tek fazlı sistemlere göre daha kısadır. Gaz dönüşüm verimi ve üretilen gazdaki metan konsantrasyonu tek aşamalı sistemlere göre daha yüksektir (Yu et al., 2002). Ayrıca iki aşamalı sistemlerde organik yükleme ilk reaktöre yapıldığından, metan üretiminin gerçekleştiği ikinci reaktöre daha sabit yükleme gerçekleşir (Bouallagui et al., 2004).

Özellikle kolay kontrol edilebilmeleri ve fermantasyon işlemi aşamalarının daha rahat incelenebilmesi ve geliştirilebilmesi nedeniyle tercih edilirler. Tek aşamalı sistemlerde sabit performans gösteremeyen atıklar için iki aşamalı sistemlerin kullanımı uygundur. İki aşamalı sistemlerde sabit bir biyolojik performansın sağlanabilmesi için de atıkların bekleme süresi dikkatli seçilmelidir (Vandevivere et al., 2003).

Tasarımlarının daha karmaşık olması, yüksek yatırım maliyetleri ve metan üretiminde oluşabilecek sorunlardan dolayı daha az biyogaz eldesi riski, iki aşamalı sistemler için kısıtlayıcı unsurlardır (Vandevivere et al., 2003).

2.3.3. Ardışık kesikli sistemler

Ardışık kesikli reaktörde, atıklar fermantöre bir kez beslenir ve tüm bozunma aşamalarından sırayla geçmesine izin verilir. Bu tür sistemlerde birinci aşama olan asit üretimi ile ikinci aşama olan metan üretimi arasında net bir ayrım vardır. Ardışık kesikli sistemler genel olarak kuru fermantasyon uygulaması için kullanılırlar (Vandevivere et al., 2003). Yapılan deneysel çalışmalarda mezofilik ve termofilik şartlarda ardışık kesikli reaktörlerden benzer verimler alındığı gözlenmiştir (Converti ve arkadaşları, 1999).

Kesikli reaktörlerin kullanımını diğer reaktör tipleri kadar yaygın değildir. Ancak basit tasarım ve kontrol şartları, büyük ve ağır kirliliklere karşı olan dirençleri ve esneklikleri, reaktörde yavaş büyüyen anaerobik bakterilerin yüksek miktarda oluşumuna ortam sağlamaları ve düşük ilk yatırım maliyetleri ile özellikle gelişmekte olan ülkelerde tercih edilmektedirler (Bouallagui et al., 2004; 2005).

Sistem çalışması sırasında oluşan koku sorunu ve döngünün boşaltılmasında yaşanan sıkıntılar, kesikli sistemlerin kullanımını sınırlandırmaktadır (Comino et al., 2009)

2.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Atıklar ve Kofermantasyon Uygulaması

Biyogaz üretiminde kullanılan başlıca atıklar, hayvansal atıklar (büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan), tarımsal atıklar, gıda atıkları, evsel katı ve sıvı atıklar, endüstriyel atıklar, atıksu arıtma tesisi atıkları ve mısır silajı gibi özel olarak yetiştirilen ürünlerdir.

Tarım ve hayvancılıktan kaynaklanan atık ve gübreler, biyogaz eldesinde önemli bir yere sahiptir. Fotosentez amacıyla bitkiler tarafından tutulan enerjinin, insanların beslenmesi için sadece 1/150'si kullanılmaktadır (Wellinger et al., 1984). Hayvanlar ise yemdeki besin maddelerinin en fazla %45'inden yararlanabilirler (Evliya, 1964) ve bitki besin maddelerinin yarısından fazlası dışkı ile gübreye geçer. Bu nedenle beslenme amacıyla kullanılmayan bitkisel ve hayvansal artıkların biyogaz üretimde yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynağı olarak kullanılması gündeme gelmiştir. Tarım işletmelerinde yeşil ot, silaj artıkları, enerji bitkileri, budama atıkları gibi hasat artıklarının da biyogaz üretiminde kullanılmaları mümkündür. Ancak bu materyallerin genellikle yılın belirli mevsimlerinde bulunabilmesi, temin açısından sorun yaratabilir.

Gıda sanayi atıkları geniş bir spektrum içerisinde yer alırlar. Çok düşük düzeyde kuru madde içeriğine sahip olan materyaller yanında, yüksek kuru madde içerenler de vardır. Üretimleri yılın belirli mevsimlerinde olanlar yanında, tüm sene kullanılacak olanlar da bulunmaktadır. Gıda sanayi atıklarının en önemli avantajı zararlı maddeleri çok düşük düzeyde içermeleri ya da hiç içermemeleridir. Üretilen gaz miktarı, çiftlik gübrelerinden üretilenden daha fazladır. Bu nedenle

tesisin ekonomik işletilmesinde katkıları bulunmaktadır. Ayrıca homojen bir yapıya da sahiptirler.

Evsel sıvı ve katı atıklar, homojen bir yapıya sahip değildirler. Fiziki büyüklükleri tekdüze olmadığı gibi kimyasal içerikleri de farklılık gösterir. Yıl içerisinde de içerikleri değişmektedir. Zararlı maddeleri içermeye riskleri yüksektir. Ayrıca evsel sıvı atıklar besin maddeleri açısından zengin olduğu için fermantasyon materyalinin sulandırılmasında kullanılabilir. Bunun yanı sıra atıksu arıtma tesislerinde anaerobik fermantasyonla biyogaz eldesi, oldukça yaygın bir uygulamadır.

Pek çok endüstride de atıklardan biyogaz eldesi uygulanmaktadır. Bazı bölgelerde de biyogaz eldesi için enerji mahsulü olarak tarımsal ürünler yetiştirilmektedir.

Bu atıkların yanı sıra kesimhane atıkları da anaerobik fermantasyon için uygundur. Ancak koku ve hijyen sorunu bulunmaktadır. Kuru madde içeriklerinin düşük olması sorun yaratabilir. Ayrıca yemek artıkları da biyogaz eldesinde kullanılabilir. Zararlı maddeleri çok az düzeyde içerir. Büyük mutfaklardan alınan atıklarda bulunan kemiklerin öğütülmesi gerekir. Fermantasyon öncesi pastörize edilmeleri gerekebilir.

Biyogaz üretiminde yaygın olarak kullanılan atık türleri ve bu atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarları Çizelge 2.3'te yer almaktadır.

Çizelge 2.3. Atıklardan ortalama biyogaz üretim miktarları (Werner et al., 1989).

Besi Maddesi	Gaz Üretim Aralığı (lt/kgOKM)	Ortalama Gaz Üretim Değeri (lt/kgOKM)
Domuz Gübresi	340-550	450
Sığır Gübresi	150-350	250
Kümes Hayvanları Gübresi	310-620	460
At Gübresi	200-350	250
Koyun Gübresi	100-310	200
Ahır Gübresi	175-320	225
Tahıl Atığı	180-320	250
Mısır Samanı	350-480	410
Pirinç Samanı	170-280	220
Çim	280-550	410
Fil Çimeni	330-560	445
Küspe	140-190	160
Bitkisel Atıklar	300-400	350
Su Sümbülü	300-350	325
Alg	380-550	460
Kanalizasyon Çamuru	310-640	450

Organik atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı, atıkların kimyasal yapısına, bakterilerin ihtiyaç duyduğu besin maddesi içeriklerine, selüloz miktarına, C/N oranına ve biyokimyasal olarak parçalanabilme özelliklerine göre değişir. Farklı organik atıkların içerikleri ve elde edilebilecek elektrik ve ısı enerjisi değerleri Çizelge 2.4'te özetlenmiştir (Kuhn, 1995).

Anaerobik fermantasyon ile biyogaz üretimi konusunda yapılan ilk çalışmalarda çiftlik gübresi kullanılmıştır. Zaman içerisinde edinilen tecrübelerle, fermantasyon işleminde farklı atık türlerinin gübre ile birlikte kullanımı gündeme gelmiştir (Bouallagui et al., 2009).

Birden fazla atık malzemenin homojen karışımının fermantasyonu, kofermantasyon, farklı tipte kullanılan malzemeler ise komateryal olarak adlandırılır (Bouallagui et al., 2009). Proses performansını artırma ve farklı atık türlerini eş zamanlı ve daha ekonomik olarak değerlendirebilme şansı sunan kofermantasyon uygulamasında tarımsal, kentsel, kırsal ve endüstriyel katı ve sıvı atıklar başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Cavinato et al., 2008; Bouallagui et al., 2009). Kofermantasyon uygulamalarında, reaktörde fermantasyon işleminin gerçekleşebilmesinde gerekli ve yeterli bakteri

popülasyonunun sağlanabilmesi için, çiftlik gübresi genellikle ana bileşen olarak gereklidir (Bouallagui et al., 2009). Diğer atık türleri çiftlik gübresi ile birlikte kullanılır. Kullanılacak komateryalin zararlı bileşenler yönünden incelenmesi önemlidir.

Çizelge 2.4. Farklı organik atıkların yapıları ve enerji üretimi (Kuhn, 1995)

Materyal	KM* (%)	OKM** (%)	N _{top} (%)	NH ₄ ⁺ -N ⁺ (%-N _{top})	P ₂ O ₅ (%KM)	K ₂ O (%KM)	Enerji Üretimi (kWsa/kgOKM)	Isı Üretimi (kWsa/kgOKM)
Sığır gübresi	6-11	68-85	2,6	39-60	0,5-3,3	5,5-10	0,46	0,49
Tavuk gübresi	10-29	75-77	2,3-6	69-70	2,3-6,2	1,2-3,5	0,55	0,60
Koyun gübresi	25-30	80	3	35	1,2-1,7	2,7-4,8	0,92	0,99
At gübresi	28	75	2,1		1	1,8	0,69	0,74
Ot silajı	26-82	67-98	3,5-6,9	6,9-19,8	0,38-0,76	-	1,15	1,23
Yonca	20	80	2,8	-	0,7	3	0,92	0,99
Tahıl samanı	85-90	85-89	0,5	-	0,2-0,4	11-2,3	0,69	0,74
Mısır samanı	86	72	1,2	-	0,5	1,7	1,38	1,48
Pancar yaprağı	15-18	78-80	2,0-2,5	-	0,5-1,1	4,0-4,7	0,92	0,99
Patates yaprağı	25	79	1,5	-	0,5	2,9	1,15	1,23
Elma posası	2-3,7	94-95	-	-	0,73	-	0,69	0,74
Patates posası	12-15	90	5-13	-	0,9	6,4	0,76	0,87
Bira yapım atıkları	21-15	66-95	4-5	-	1,5	1,2	1,84	1,98
Sebze atıkları	5-20	76-90	3-5	-	0,8	1,1	0,92	0,99
Biyočöp	40-75	30-70	0,5-2,7	7	0,2-0,8	0,3-0,8	0,46	0,49
Çimen	11,7	87-93	3,3-4,3	-	0,3-2	2-9	1,38	1,48
Yemek atıkları	9-37	74-98	0,6-5,0	1,5-22,0	0,3-1,5	0,3-1,2	1,15	1,23

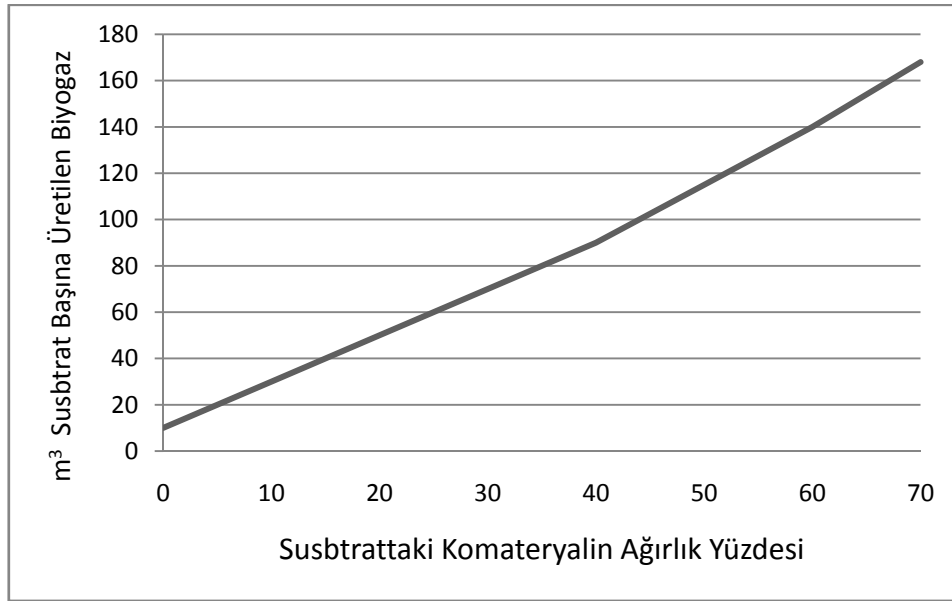
*KM: kuru madde

**OKM: organik kuru madde

Kofermantasyon işlemi aşağıda belirtilen pek çok ekolojik, teknolojik ve ekonomik fayda sağlar (Sosnowski et al., 2003; Jingura and Matengaifa, 2009).

- Farklı malzemeler içermesi nedeni ile sağladığı gelişmiş ve dengelenmiş nütrient miktarı, kararlı ve sürekli bir fermantör performansı ve nihai ürün olarak iyi kalitede gübre sağlar.
- Homojen hale getirme sonucunda, farklı karakterdeki atıkların birbirini etkileyerek kalitelerinin optimizasyonunu ve potansiyel toksik bileşiklerin seyrelmesini sağlar.
- Tek başına hayvan gübresi kullanımı ekonomik olarak mevcut petrol fiyatları ile rekabet edebilir değildir. Farklı atıkların kullanımı ile sağlanan yüksek CH₄ potansiyeli, gaz veriminin artmasını sağlar. Böylece rekabet gücü artar.
- Biyolojik olarak parçalanabilen organik madde yüklemesini artırır ve böylece daha iyi biyogaz verimi sağlar.

Tarımsal tesislerde komateryal kullanımının biyogaz verimine etkisi Şekil 2.2'de görüldüğü gibidir:



Şekil 2.2. Tarımsal tesislerde komateryal kullanımının biyogaz verimine etkisi (Deublein and Steinhauser, 2008).

Farklı organik materyal ilavesinin biyogaz üretimine etkisinin belirlenmesi amacıyla kuru madde içeriği %4,5 ve metan içeriği %65 olan domuz gübresine farklı türde organik maddeler ilave edilmiştir Çalışmada kullanılan atıklar ve gaz üretimine etkileri Çizelge 2.5'te yer aldığı gibidir (Baserga, 1998).

Çizelge 2.5. Farklı organik materyal ilavelerinin gaz üretim verimine etkisi (Baserga, 1998)

Organik Materyal	Kuru Madde İçeriği (%)	Gaz Üretimi (l/kgOKM)	CH ₄ (%)	Eklenen Miktar (% ağırlık)	Üretim Artışı (%)	Karışımın Kuru Madde İçeriği (%)
Sebze atıkları	12	600	60	100	360	8-9
Mezbaha atıkları	16	360	62	20	60	7-8
Kullanılmış yağ	50	1.000	70	5	200	8
Yeşil ot	35	500	56	10	120	8
Buğday sapı	83	470	60	5	100	8

Yapılan çalışmalara göre domuz gübresine %100 oranında sebze atıklarının eklenmesi ile %360, %20 oranında mezbaha atıklarının eklenmesi ile %60, %5 oranında kullanılmış yağ eklenmesi ile %200, %10 oranında yeşil ot eklenmesi ile %120 ve %5 oranında buğday sapı eklenmesi ile %100 oranlarında biyogaz üretiminde artış gözlenmiştir (Baserga, 1998).

Kofermantasyon ile ilgili Macias-Corral tarafından yapılan çalışmalarda ise, tek bir atık kullanılan anaerobik fermentasyon ile belediye atıkları ve tarımsal kaynaklı atıkları 2 fazlı sistemde kullanan kofermantasyon karşılaştırılmıştır. Denemeler süresince tek aşamalı sistemlerin, pH'ın yükselmesi nedeni ile 50 gün sonunda durduğu, komateryal kullanılan sistemlerin ise 2 ay daha fazla çalışmasını sorunsuz sürdürdüğü gözlenmiştir. Çalışmanın sonunda iki fazlı kofermantasyon sisteminde %72'nin üzerinde metan verimi elde edilirken, tek aşamalı tek tür atık kullanılan sistemde %60 oranında metan üretilmiştir (Macias-Coral et al., 2008).

Bir başka çalışmada ise 3 farklı atık türü ve 2 farklı reaktör üzerinde denemeler yapılmıştır. Reaktör olarak termofilik şartlarda çalışan ardışık kesikli sistem ile; asit üretimi termofilik, metan üretimi mezofilik şartlarda çalışan sürekli iki aşamalı sistem kullanılmıştır. Bu sistemler üzerinde kanalizasyon çamuru, belediye katı atıklarının organik kısmı ve kanalizasyon çamuru ile belediye katı atıklarının organik kısmı %75-%25 oranında karıştırılarak denemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, sürekli beslemeli iki aşamalı sistemlerde, kesikli sistemlere göre

daha fazla metan üretimi gözlenmiştir. En kısa sürede ve en yüksek miktarda biyogaz oluşumu belediye katı atıklarından elde edilmiştir. Kanalizasyon çamurundan biyogaz eldesi daha geç başlamış ve diğer atıklara göre daha uzun süre gaz üretimi gerçekleşmiştir. İki atık türünün kofermantasyonunda ise kısa sürede gaz üretimi başlamış ve daha sabit düzeyde üretim sürmüştür (Sosnowski et al., 2003).

Böylece yapılan çalışmalar ile kofermantasyon uygulamasının biyogaz verimini arttırdığı ve aynı zamanda çevre, insan ve diğer canlılar üzerindeki olumlu etkileri ile enerji eldesi, fermente atık üretimi ve sera gazı emisyonları azaltımı ile sosyo-ekonomik faydaları arttırdığı da belirlenmiştir (Holm-Nielsen et al., 2009).

2.5. Biyogaz Kullanım ve Uygulama Alanları

Biyogaz, tüm dünyada artan bir ilgi ile önemli bir enerji kaynağı haline gelmektedir. Biyogaz tesisleri aynı zamanda enerji üretim santrali olarak da değerlendirilmektedir.

Biyogaz, ham ya da saflaştırılmış olarak pek çok şekilde kullanılabilir. Biyogazın başlıca kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Igoni et al., 2008; Holm-Nielsen et al., 2009):

- Isı ve/veya buhar üretimi,
- Birleşik ısı ve güç sistemleri ile elektrik üretimi,
- Isı, buhar, elektrik ve soğutma için endüstriyel enerji kaynağı üretimi,
- Saflaştırılarak motorlu taşıt yakıtı üretimi,
- Saflaştırılarak doğalgaz şebekesine verilmesi,
- Yakıt pilleri için yakıt olarak kullanımı,
- Kimyasal üretimi.

Biyogazın kullanım alanları arasında motorlu taşıt yakıtı olarak kullanılabilmesi ve doğalgaz şebekesine verilebilmesi önem taşır. Biyogaz, alternatif bir enerji kaynağı olup, benzin, dizel, LPG ve doğalgazın yerine hem binek taşıtlarda hem de ağır vasıtalarda kullanılacak bir yakıttır. Biyogaz içerisinde bulunan ve mekanik parçalarda korozyona neden olan H_2S , biyogazdan ayrıştırılarak doğrudan gaz motorlarında kullanılıp elektrik üretilmektedir. Biyogazdaki H_2S içeriğinin

300-500 ppm'in üzerinde olması halinde, enerji dönüşümü zarar görür (Holm-Nielsen et al., 2009). Biyogazın motorlu taşıtlarda kullanılması ve doğalgaz hatlarına verilebilmesi için içerisindeki H₂S'in birkaç ppm mertebelerine düşürülmesi ve buna ek olarak CO₂'nin de ayrıştırılarak metan oranının %97'lere yükseltilmesi gerekir. Bu işlem biyogazın saflaştırılması, metanca zenginleştirilmesi ya da biyometan oluşumu olarak adlandırılır. (Murphy and McKeogh, 2004; Eyidoğan, 2008; Murphy and Power, 2009; Osorio and Torres, 2009). Biyogazın saflaştırılması; motor, kazan, yakıt pili ve motorlu taşıtlar gibi gaz tertibatları için gerekli olan şartların sağlanması, biyogaz ısıl değerinin artırılması ve/veya biyogaz kalitesinin standardize edilmesi açısından gereklidir (Osorio and Torres, 2009). Saflaştırma işlemi CO₂ giderimi ile yapılır. Biyogaz içerisindeki CO₂'in ayrıştırılması için suda çözme, fiziksel, kimyasal ve biyolojik absorpsiyon, polietilen glikol ve membran ile ayrıştırma gibi yöntemler kullanılır (Eyidoğan, 2008; Murphy and Power, 2009; Osorio and Torres, 2009).

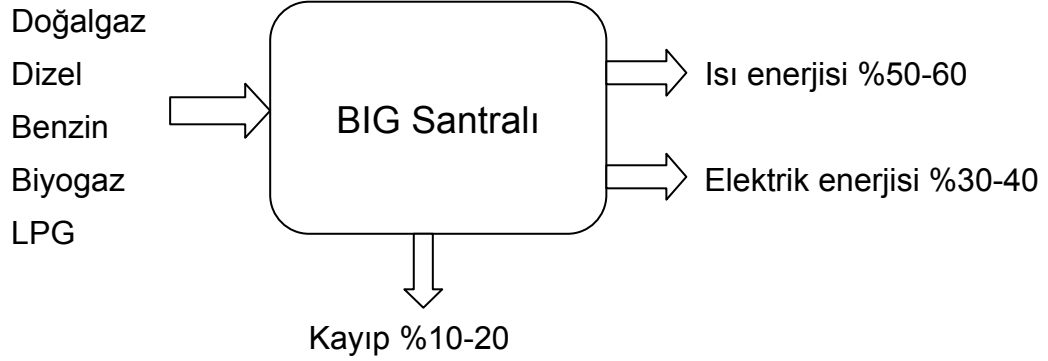
Saflaştırılarak metan oranı yükseltilen ve H₂S'i ayrıştırılan biyogaz, 200-250 bar basınç altında sıkıştırılarak benzin-biyogaz veya benzin-sıkıştırılmış doğalgazla çalışabilen çift yakıtlı motorlu taşıtlarda hiçbir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir. Böylece biyogazın yakıt olarak kullanılması ile NO_x, CO₂ emisyonları ve partikül miktarı azalmaktadır (Eyidoğan, 2008).

Biyogazın en önemli kullanım alanlarından biri ısı ve elektrik üretiminde kullanılmasıdır. Tez kapsamında incelenen pilot projede biyogazdan ısı ve elektrik üretimi sözkonusu olduğundan, bu teknoloji detaylı olarak incelenmiştir.

Tek bir sistemden eş zamanlı olarak elektrik ve/veya mekanik güç ile kullanılabilir ısı üretimi kojenerasyon veya diğer adıyla birleşik ısı ve güç üretimi olarak adlandırılır. Bu birliktelik, iki enerji formunun da tek tek kendi başlarına ayrı yerlerde üretilmesinden daha ekonomik neticeler oluşturmaktadır (Tricase and Lombardi, 2009).

Birleşik ısı ve güç (BIG) sistemleri pek çok ülkede, anaerobik fermantasyondan elde edilen biyogazın enerjiye dönüşümünde kullanılmakta, fosil yakıtların kullanımında olduğu gibi biyogazdan da ısı ve/veya elektrik enerjisi üretilmektedir.

BIG sistemleri, yakıtın enerji içeriğinin yaklaşık %30'unun elektrik ve %60'ının ısı enerjisi olmak üzere toplamda %90'ının kullanımına olanak sağlar (Seadi et al, 2008; Tricase and Lombardi, 2009), (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Birleşik ısı ve güç santralının şematik görünüşü (Seadi et al, 2008; Tricase and Lombardi, 2009)

Biyogaz uygulamalarında BIG sistemlerinde üretilen elektriğin bir kısmı biyogaz tesisi tüketimi için, bir kısmı da pompa ve kontrol sistemleri gibi elektrik ekipmanlarının ihtiyacı için kullanılabilir. Kalan kısım ise şebekeye verilerek genel kullanıma katkı sağlanabilir.

Yakma işlemi sonucu oluşan atık ısının ise bir kısmı öncelikle reaktörlerin sıcaklık kontrolünde kullanılabilir, çünkü mevsimsel şartlara ve/veya işletim koşullarına bağlı olarak reaktörlerin ısıtılması gerekebilir. Geri kalan yaklaşık 2/3'lük ısı enerjisi, tesiste bulunan kapalı alanların, yerleşim yerlerinin, küçük ölçekli tarlada kurulmuş bir tesis ise ahırların ya da içme ve kullanma sularının ısıtılmasında kullanılabilir.

BIG sistemlerinde jeneratörün çalışmasında gaz türbini, gaz motoru ve dizel motoru olmak üzere 3 farklı motor kullanılmaktadır. Gaz türbini, havayı sıkıştırıp gaz veya sıvı yakıtı yakarak elektrik jeneratörünü döndüren sistemdir. Gaz türbininden çıkan egzoz gazları, sıcaklığı çok fazla olduğundan, atık ısı kazanında değerlendirilip yüksek verimde ısı enerjisi elde etmede kullanılmaktadır. Gaz türbinleri genel olarak 1 MW ve üstü güçlerde kullanılmakta ve ısı üretimleri türbin çıkış gücünün 2,5-3 katı kadar olmaktadır (İGDAŞ, 2007).

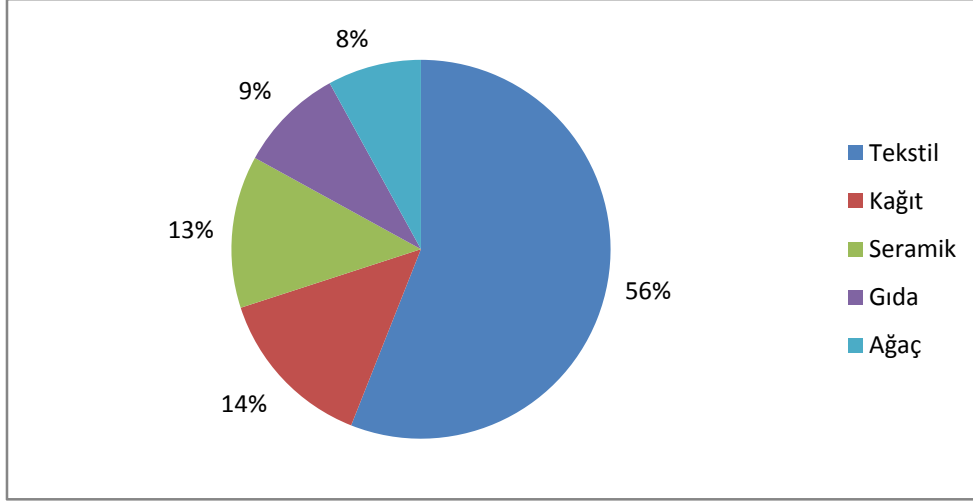
Gaz motorları düşük devirli, çok silindri ve 50-3.500 kW güç aralığında çalışan sistemdir ve ısı üretimleri güç çıkışının 1-1,5 katı kadar olmaktadır. Gaz motorları;

doğalgaz, propan veya biyogaz ile çalışabilmektedir. Azot oksit emisyonu düşük olduğundan çevre dostudur (İGDAŞ, 2007).

Dizel motorlar çok silindri olup 200-22.000 kW çıkış güçleri arasında çalışmaktadır. Dizel motorlarda motorin ya da ağır fueloil yakıtlar kullanılmaktadır. Elektrik üretim verimi yüksek, atık ısı üretimi düşüktür. Genellikle güç çıkışına eşit ısı üretimine sahiptir (İGDAŞ, 2007).

BIG sistemlerinin ekonomik ve çevresel faydalarının incelenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, bölgesel olarak farklılıklar gözlenmiştir. Bazı örneklerde sistem, mevcut elektrik şebekesinden daha ucuz üretim sağlarken, bazı örneklerde şebekeden daha pahalı üretim gerçekleşmiştir (Mueller, 2007). Bu nedenle anaerobik fermantasyonda kullanılan BIG sistemlerinin değerlendirilmesinde bölgesel koşullar önemlidir. Ayrıca uzun mesafelerde elektriğin iletimi ısı enerjisinin iletimine göre daha ucuz ve etkilidir. Bu sebepten dolayı BIG sistemleri ısı enerjisinin ihtiyaç duyulduğu bölgenin olabildiğince yakınında olmalı ve ihtiyacı karşılayabilecek boyutlarda kurulmalıdır.

Birleşik ısı ve güç sistemleri gelişmiş enerji üretim sistemi olarak kentsel yerleşimlerde ve sanayi uygulamalarında birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanılacak tesislerin kapasiteleri, ihtiyaç duyulan ısı ve elektrik enerjisi miktarına göre belirlenmektedir. BIG sistemleri petrol rafinerileri, petrokimya kompleksleri, kimya tesisleri, gübre tesisleri, tekstil boyama tesisleri, kağıt ve selüloz işleme tesisleri, ağaç işleme tesisleri, gıda üretim tesisleri, tuğla ve seramik tesislerinde ve aynı zamanda kentsel yerleşimlerin ısıtma ve soğutması ile elektrik enerjisi temininde de kullanılmaktadır (İGDAŞ, 2007). Türkiye’de BIG sistemlerinin ağırlıklı olarak kullanıldığı alanlar Şekil 2.4’te özetlenmiştir (İGDAŞ, 2007).



Şekil 2.4. Türkiye’de birleşik ısı ve güç sistemlerinin kullanıldığı alanlar (İGDAŞ, 2007)

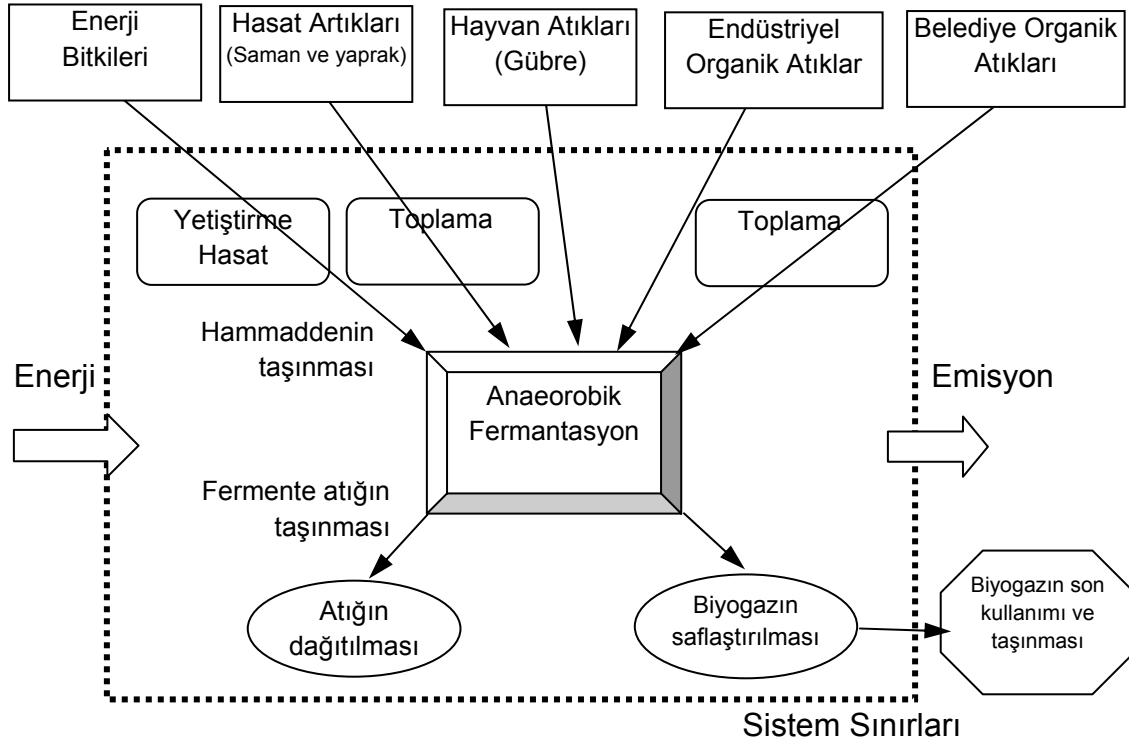
BIG sistemleri, sera gazı emisyon oranlarını azaltır, enerji güvenliğini artırır, potansiyel enerji maliyetlerini azaltır, özellikle gübrelerden kaynaklanan koku oluşumunu azaltır. Düşük maliyetlidir ve kısa sürede kurulumları mümkündür. İhtiyaç duyulan enerji türlerini istenilen zaman ve miktarda üretebilir (Mueller, 2007; Dong et al., 2009).

BIG sistemi ile kentsel, ticari ve endüstriyel kullanım için enerji eldesi mümkündür. Kendi enerjilerini kendi ürettiklerinden, dışa bağımlı değildirler. Üretilen enerji aynı kalitede ve süreklidir. Böylece elektrik kesintisi ve voltaj düşüklüğü sorunları oluşmaz. Elektrik ve ısıyı ayrı ayrı üreten sistemlere göre daha yüksek verim sağlar (Ertesvag, 2007). Atıklardan elde edilen biyogazın yakıt olarak kullanılmasıyla daha ekonomik ve daha çevre dostu enerji üretim alternatifine dönüşür. Bu sayede ticari ve endüstriyel faaliyetler için rekabet gücü artar. BIG sistemlerinin değerlendirilmesinde genel olarak, ısı ve elektriği ayrı ayrı üreten sistemlerle mukayese edilir ve verimleri karşılaştırılır (Ertesvag, 2007). Biyogaz tesisinden BIG sistemi kullanılarak ısı ve elektrik eldesinin verim hesapları ve BIG sisteminin ısı ve elektrik üretimini ayrı ayrı yapan sistemlerle mukayesesine ilişkin hesaplar 4.Bölüm’de yer almaktadır.

Biyogazın kullanım alanlarının değerlendirilmesinde, anaerobik fermantasyon sonucu oluşan katı ve sıvı haldeki fermente atıklar da önemli bir yere sahiptir. Nutrient yönünden zengin bu atıklar, fermente gübre olarak da adlandırılır ve toprak şartlandırıcısı ve gübre olarak kullanılabilir. Elde edilen gübre tarlaya sıvı

olarak uygulanabilir, granül haline getirilebilir ve/veya beton-toprak havuzlarda doğal kurumaya bırakılabilir (Mueller, 2007). Proses sonucu oluşan atıkların da değerlendirilmesi ile biyogazın kullanım ve uygulama alanları ekonomik ve çevresel açıdan daha da önem kazanmaktadır.

Biyogaz tesisinde kullanılan atıklar, anaerobik fermantasyonun sistem sınırları içerisindeki alt bileşenleri ve biyogazın kullanım alanları Şekil 2.5'te yer almaktadır.



Şekil 2.5. Biyogaz sisteminde materyal ve enerji akış diyagramı (Berglund and Börjesson, 2006).

2.6. Biyogaz Üretimini Etkileyen Temel Parametreler

Biyogaz sistemlerinde atık seçimi ve tasarım unsurlarının yanı sıra, sistem çalışma koşullarını etkileyen pek çok parametre vardır. Tesis tasarımı ve işletiminde bu parametrelerin gözönünde bulundurulması gerekir.

Anaerobik fermantasyonun gerçekleşmesi için gerekli optimum çevresel koşullar Çizelge 2.6'da özetlenmiştir:

Çizelge 2.6. Anaerobik fermantasyon çevresel gereklilikleri (Deublein and Steinhauser, 2008)

Parametre	Hidroliz / Asit Üretimi	Metan Oluşumu
Sıcaklık	25-35°C	Mezofilik: 32-42°C Termofilik: 50-58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
C/N oranı	10-45	20-30
Kuru madde oranı	< %40	< %30
Redoks potansiyeli	(+400) – (-300)mV	< -250mV
Gerekli C:N:P:S oranı	500:15:5:3	600:15:5:3
İz elementler	Özel ihtiyaç yoktur	Gerekli: Ni, Co, Mo, Se

En uygun fermentasyon prosesi için pekçok parametre gözönünde bulundurulur ve kontrol edilir.

Biyogaz üretimini etkileyen temel sistem parametreleri;

- Sıcaklık,
- Hidrolik bekleme süresi,
- Organik yükleme hızı,
- pH,
- C/N oranı,
- Mikroorganizma konsantrasyonu,
- Karıştırma,
- Işık
- İz elementler,
- Gaz giderimi,
- İnhibitörler,
- Atıkların ön arıtımı olarak sıralanabilir (Tchobanoglous et al., 2003; Aoki et al., 2006; Deublein and Steinhauser, 2008; Igoni et al., 2008).

2.6.1. Sıcaklık

Biyokimyasal reaksiyonlar, mikroorganizmaların büyümesi ve gaz üretimi açısından sıcaklığa karşı hassastır ve genel olarak sıcaklık artışı ile artar.

Anaerobik fermantasyon için en uygun sıcaklık aralığı mezofilik mikroorganizmalar için 32-42°C, termofilik mikroorganizmalar için 48-55°C'dir (Deublein and Steinhauser, 2008)

Metan oluşturucu bakteriler sıcaklık değişimine karşı çok hassastırlar. Pekçok metan üreten mikroorganizma mezofilik şartlarda gelişir, pek azı termofiliktir. Genel olarak daha düşük sıcaklıklarda da metan üretilebilir. Mikroorganizmaların büyüdüğü en düşük sıcaklık -11°C'dir. -25°C'nin altında enzim aktiviteleri durur. Termofilikler mezofiliklere göre sıcaklık değişimlerinden daha çok etkilenir. Sıcaklıktaki küçük değişimler aktivitelerde önemli hasara neden olur. Bu nedenle sıcaklık $\pm 2^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmalıdır. Aksi halde gaz kaybı %30'lara ulaşabilir. Genel olarak mezofilik şartlardaki enerji dengesi, termofilik şartlardan daha iyidir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Biyokimyasal reaksiyonla metan üretim hızı, sıcaklık artışı ile artar. Termofilik sıcaklık şartlarında mezofilik sıcaklık şartlarına göre biyokimyasal reaksiyonlar daha hızlı gerçekleşir, substrattaki mikrobiyal faaliyet daha etkindir. Bu nedenle daha etkin biyogaz verimi elde edilir. Termofilik şartlarda mezofilik şartlara göre, aynı hidrolik bekleme süresinde daha yüksek organik yükleme yapılabilir. Termofilik işletim şartlarında %50 daha fazla parçalanma olur. Dolayısıyla fermantör hacmi mezofilik şartlara göre yarı yarıya daha küçük tasarlanabilir. Termofilik şartlarda oksijen daha az çözünebilir haldedir. Bu sebeple optimum anaerobik şartlara daha kısa sürede ulaşılabilir. Daha etkili patojen giderimi sağlanabilir (Deublein and Steinhauser, 2008; Igoni et al., 2008). Ancak reaktörü termofilik şartlarda çalıştırmak için ilave ısıya ihtiyaç vardır. Özellikle kış mevsiminde tesisten elde edilen ısı ile fermantörü yüksek sıcaklıkta sabit halde tutmak bölgesel olarak güçleşebilir. Çünkü bazı bölgelerde kış mevsiminde net biyogaz üretimi negatif seviyelere düşebilir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta çalışıldığında serbest amonyak miktarının arttığı unutulmamalıdır. Bu durum fermantör performansını ve sabit çalışma halini olumsuz yönde etkileyebilir, hatta verimliliği azaltabilir. Bu nedenlerle termofilik sistemlerin kontrolü daha zordur (Aoki et al., 2006). Ayrıca yükselen sıcaklıkla proses daha değişken hale gelir ve daha düşük kalitede ve yüksek miktarda çözünmemiş katı içeren nihai ürün oluşabilir (Igoni et al., 2008). 20°C civarındaki sakrofilik sıcaklıklar, anaerobik fermantasyon için

uygun değildir. Çünkü bu sıcaklık değerlerinde uzun zincirli yağ asitleri oluşur ve sistemde birikmeleri de köpük oluşumuna neden olarak sistemi inhibe edebilir (Tchobanoglous et al., 2003; Igoni et al., 2008). Çevre sıcaklığı 10°C'nin altına düştüğünde ise genellikle gaz üretimi durur (Öztürk, 2005).

İki aşamalı sistemlerde 2. aşama için farklı sıcaklıklar yaygın olarak uygulanır. Metan üretiminin termofilik, hidroliz aşamasının mezofilik olarak kullanımı yaygındır. Ancak bazı hallerde substrata bağlı olarak hidrolizin, metan üretim aşamasından daha yüksek sıcaklıklarda işletimi uygun olabilir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Fermantörlerde sıcaklığın ani olarak değişmesi bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Bu durum biyokimyasal reaksiyonu yavaşlatır. Fermantörün ani sıcaklık değişimlerinden etkilenmesinin azaltılması için gece ile gündüz arasında sıcaklık farkının çok olduğu yerlerde fermantörler yer altına gömülerek inşa edilebilir. Tesis için seçilen sıcaklığın sürekliliğinin sağlanması da önemlidir (Mattocks, 1984; Öztürk, 2005).

2.6.2. Hidrolik bekleme süresi

Hidrolik bekleme süresi, fermantördeki organik maddelerin bakteriler tarafından fermante edilmesi sonucu biyogaz üretilmesi için gerekli olan süre olarak tarif edilir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Fermantör içindeki bazı organik maddeler tam olarak biyokimyasal reaksiyona girdiğinde zamanla gaz üretimi azalmaya başlar. Seçilen hidrolik bekleme süresi içinde besi maddelerinin %70-80 oranında biyokimyasal reaksiyona girerek bertaraf olduğu kabul edilir. Biyogaz tesislerinde işletme sıcaklığına bağlı olarak hidrolik bekleme süresi 20 ile 120 gün arasında değişir. Sıcak iklimler için 40-50 gün, soğuk iklimler için ise 90-100 gün bekleme süreleri seçilebilir (Öztürk, 2005).

Sürekli beslemeli sistemlerde, hidrolik bekleme süresi yeterli olmazsa fermantörden bakteri kaçıışı olur ve uçucu yağ asidi konsantrasyonu artar. Böylece fermantasyon tam olarak gerçekleşemez. Bu durum da biogaz üretiminin düşmesine neden olur. Bu gibi durumlarda hidrolik bekleme süresi daha uzun seçilebilir (Öztürk, 2005).

Fermantör sıcaklığı arttıkça hidrolik bekleme süresi düşer. Çünkü yüksek sıcaklıkta biyokimyasal reaksiyonlar daha kısa sürede gerçekleşir. Dolayısıyla hidrolik bekleme süresini, uygulanacak sıcaklığa göre seçmek gerekir (Deublein and Steinhauser, 2008).

2.6.3. Organik yükleme hızı

Organik yükleme hızı, birim hacim fermantöre günlük olarak beslenen organik madde miktarı olarak tarif edilir. Organik yükleme hızı, sıcaklığa, atıktaki organik kuru madde miktarına ve bekleme süresine bağlıdır (Öztürk, 2005; Igoni et al., 2008).

Yükleme oranı, günlük olarak fermantöre beslenen uçucu katıların miktarının belirlenmesini sağladığından, proses için önemli bir parametredir (Igoni et al., 2008).

Atıktaki %12'den fazla katı miktarı, gaz üretimini olumsuz etkiler. Ekonomik sebeplerden ötürü katı madde, kuru madde miktarının %30'unu geçmemelidir. Çünkü;

- Çok düşük su içeriği hücre büyümesini geciktirir.
- Substrattaki malzeme transferi limitleyici faktör olur.
- Biyokütle pompalanamaz ve karıştırılmaz.

Çok düşük yüklemelerde ise proses çalışır ancak çok fazla su geçişi olduğundan ekonomik olmaz.

Anaerobik arıtma esnasında mümkünse optimum organik yükleme hızı korunmalıdır. Organik yükleme hızı yüksek olduğunda fermantör içinde asit birikmesi olur ve pH düşer. pH'ın düşmesi metanojenik bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Bu da gaz üretim hızını düşürür, hatta durdurur. Benzer şekilde organik besleme hızı düştüğü zaman gaz üretim hızı düşer (Öztürk, 2005).

Hacimsel yük değişiminin etkilerinden kaçınmak için fermantör günde 2 kez ya da sürekli olarak beslenmelidir.

Ekonomik nedenlerden ötürü biyogaz reaktörleri maksimum parçalanabilir organik maddenin %65-75'inin ayrıştırılması esasına göre dizayn edilmelidir (Murphy et al. 2004; Deublein and Steinhauser, 2008).

2.6.4. pH

Fermantörde kullanılan malzemenin pH'ı anaerobik fermantasyon prosesini etkiler. Hidrojen iyonu konsantrasyonunun mikrobiyal büyümede doğrudan etkisi vardır, çünkü aşırı asit oluşumu, fermantasyonu inhibe eder (Igoni et al., 2008).

Metan üreten mikroorganizmalar için optimum pH 6,7-7,5'tir. pH 6,5'in altına düşerse, üretilen organik asitler, pH'ın hızla düşmesine neden olur. Bu durum metan oluşturan bakteriler üzerinde toksik etki yapar ve fermantasyonu durdurabilir. Dolayısıyla ortamda asit oluşturuucu bakteri konsantrasyonunda artma olur. Fermantörde yağ asidi konsantrasyonu belli değerin üzerine çıktığında metan oluşumu tamamen durur. Bu durum özellikle aşırı organik yükleme ve sıcaklığın şok olarak düşmesinden dolayı meydana gelir (Öztürk, 2005; Deublein and Steinhauser, 2008).

pH 4'te tüm CO₂ serbest molekül halde bulunur. pH 13'te tüm CO₂ substratta karbonat olarak çözülmüş halde bulunur (Deublein and Steinhauser, 2008).

Fermantörlerde pH düştüğü zaman iki yaklaşım uygulanır. Birinci yaklaşımda organik madde beslemesi kesilmelidir. Böylece ortamda metanojenik mikroorganizmaların konsantrasyonu artırılarak yağ asidi konsantrasyonu azaltılabilir. pH kabul edilebilir seviyeye yükseldikten sonra (6,8 civarı) atık beslemesine tekrar devam edilir. İkinci yaklaşım, pH'i yükseltmek ve tamponlama kapasitesini artırmak için ortama kimyasal madde ilave edilmesidir. Kimyasal madde ilave etmenin en önemli avantajı pH'ı derhal kararlı hale getirebilmesidir. pH'ı yükseltmek için kimyasal madde olarak genellikle kireç kullanılır. Ancak kireç kalsiyum karbonat oluşumuna neden olduğundan alternatif olarak sodyum bikarbonat da kullanılabilir (Öztürk, 2005).

2.6.5. C/N oranı

Karbon ve azot konsantrasyonu, anaerobik fermantasyonun performansını belirler. Genel olarak bu parametrelerden biri sistemde engelleyici unsur olarak gelişir (Igoni et al., 2008).

Biyogaz üretiminde kullanılan tüm besi maddeleri, belli oranlarda karbon, azot ve oksijen içerirler. Organik maddelerdeki karbon, anaerobik bakterilerin enerji ihtiyacı için gereklidir. Karbondan başka en önemli besi maddeleri azot ve fosfordur. Azot bakterilerin büyümesi ve çoğalması için gereklidir (Öztürk, 2005).

Besi maddesinde azot bulunmasının iki faydası vardır. Birincisi, aminoasitlerin, proteinlerin ve nükleik asitlerin sentezi için gerekli elementi sağlar. İkincisi, amonyağa dönüşen azotun uçucu yağ asitlerini tamponlayarak pH'ın düşmesini önler. Böylece metan oluşturuucu bakterilerin büyümesi için uygun pH şartları sağlanmış olur (Öztürk, 2005).

Besi maddesindeki bileşikler, biyoreaktörde mevcut farklı bakteriler tarafından kullanılırlar. Substrattaki C/N oranı 16:1-25:1 arasında olmalıdır (Deublein and Steinhauser, 2008). Başka bir yaklaşımda ise en uygun işletim şartları için hammaddedeki C/N oranınının 30:1 olması gerektiği vurgulanmıştır (Igoni et al., 2008).

Anaerobik proste fazla miktarda biyokütle geliştirilmediğinden nütrient ihtiyacı azdır. Bu nedenle metan üretimi için nütrient oranı C:N:P:S için 500-1000:15-20:5:3 ve/veya organik madde oranı KOİ:N:P:S için 800:5:1:0,5 etkilidir (Deublein and Steinhauser, 2008).

Substrattaki çok düşük C/N oranı NH₃ üretimini yükseltir ve metan üretimini inhibe eder. Çok yüksek C/N oranı azot eksikliği anlamındadır, bu da protein üretimi için olumsuz etki yapar.

Optimum C/N oranı farklı organik maddelerin kofermantasyonu ile elde edilebilir. (Öztürk, 2005).

2.6.6. Mikroorganizma konsantrasyonu

Genel olarak metan üreten mikroorganizmaların yeniden oluşmaları için uzun sürelerle ihtiyaçları vardır. Mikroorganizmaların reaktörden yıkanmalarını önlemek için, biyokütlenin bekletilmediği ve geri devrettirilmediği sistemlerde hidrolik bekleme süresi en az 10-15 gün seçilmelidir (Deublein and Steinhauser, 2008)..

Metan üreten mikroorganizmalar ile karşılaştırıldığında hidroliz ve asit üretiminde görev alan bakteriler için, yenilenme süresi çok daha kısadır. Bu nedenle sistemden yıkanarak atılma riskleri yoktur.

Metan üreten bakterilerin düşük üreme hızları nedeniyle biyogaz tesisleri için 3 aya kadar sistemi hizmete alma süresine ihtiyaç vardır (Deublein and Steinhauser, 2008). Çünkü sistemin tam kapasite çalışması için aşılınmış çamur gereklidir. Bu da başlangıç aşamasında oluşturulur.

2.6.7. Karıştırma

Reaktördeki karıştırma işleminin sisteme kazandırdığı kararlılığın sağlanabilmesi ve sürdürülebilmesi açısından faydalar, aşağıdaki gibidir (Aoki et al., 2006; Deublein and Steinhauser, 2008).

- Üretilen biyogaz çıkışını hızlandırır,
- Bakteri popülasyonu ile taze atığın birbirine karışmasını sağlayarak reaksiyonu hızlandırır,
- Reaktör üst yüzeyinde filamentli mikroorganizmaların gelişmesi ile oluşan ve gaz deşarjını önleyen köpük oluşumunu engeller,
- Atıklarda yer alan küçük partiküllerin tabana çökmesini önler,
- Fermantör içerisinde sıcaklık dağılımının homojenliğini sağlar,
- Fermantördeki bakteri popülasyonu yoğunluğunu düzenler,
- Reaktör içerisinde ölü alanların oluşumunu engeller.

Karıştırma işlemi çok etkin ve dikkatli bir şekilde yapılmalı ve işlem esnasında aşağıda belirtilen konulara dikkat edilmelidir (Deublein and Steinhauser, 2008):

- Fermantörden biyogaz etkili bir şekilde alınmalıdır.

- Asit ve metan üreten mikroorganizmalar arasındaki simbiyoz yaşama zarar verilmemelidir.
- Mikroorganizmalar strese karşı hassas olduklarından çok güçlü karıştırmadan kaçınılmalıdır.
- Karıştırma işlemi sırasında enerji tüketimi minimize edilmelidir.

2.6.8. Işık

Işık, metan bakterilerine öldürücü etki yapmaz ancak metan eldesini inhibe eder. Bu nedenle metan oluşumu tamamen ışıksız ortamda gerçekleştirilmelidir (Deublein and Steinhauser, 2008).

2.6.9. İz elementler

Mikroorganizmalar hayatta kalmak için minimum konsantrasyonlarda Fe, Co, Ni, Se, W ve Mg gibi iz elementlere ihtiyaç duyar. Bu nedenle bakteri türüne göre ihtiyaç duyulan iz elementlerin de reaktörde bulunması gerekir (Deublein and Steinhauser, 2008).

2.6.10. Gaz giderimi

CH₄, CO₂, H₂S gibi üretilen gazların atıklardan giderimi, biyolojik reaksiyonlarda önemli etkiye neden olur, mikroorganizma konsantrasyonlarında artış sağlanır. Bu nedenle oluşan biyogazın düzenli olarak alınması ve sistemde oluşan ve korozyona neden olan H₂S gibi gazların da özel mekanizma ve ekipmanlar ile sistemden uzaklaştırılması gerekir (Aoki et al., 2006).

2.6.11. İnhibitörler

İnhibisyon etkisi, inhibitörün konsantrasyonuna, substratın yapısına ve bakterinin substrata olan adaptasyonuna bağlıdır. Anaerobik bakteriler düşük konsantrasyonda inhibitörlere, iz element olarak ihtiyaç duyarlar ve büyük miktarını parçalarlar.

Oksijen, sülfür bileşikleri, yağ asitleri ve aminoasitler gibi organik asitler, NO₃, NH₄, NH₃, ağır metaller, tanenler, dezenfektanlar, herbisitler, insektisitler, yüzey aktif maddeleri ve antibiyotikler önemli inhibitörlerdendir (Öztürk, 2005; Deublein and Steinhauser, 2008).

2.6.12. Atıkların önartımı

Anaerobik fermantasyon işlemi öncesi, kullanılan atık türlerine bağlı olarak bazı önartma işlemleri gerekebilir. Fermantasyon işlemi, organik maddelerin parçalanması olduğundan, öncelikle inorganik atıklar ayrılmalıdır. Ayrıca, fermantör çalışmasına zarar verecek boyuttaki atıklar için parçalama/öğütme işlemleri ön arıtma olarak kullanılabilir (Igoni et al., 2008).

Atıkların partikül boyutu, atığın biyolojik dönüşümünü, dolayısıyla fermantör ve ekipmanın kapasitelerini etkiler. Biyokütlenin spesifik yüzeyi arttıkça, biyogaz verimi artar, ancak aradaki ilişki lineer değildir. İnce ve küçük partiküllerin parçalanması büyük partiküllerin parçalanmasına göre daha az katkı sağlar (Deublein and Steinhauser, 2008).

Farklı türdeki atıkların kofermantasyon uygulamasında, sistemin ıslak ya da kuru çalışma prensibine göre nem oranına bağlı olarak atıkların sisteme belirli karışım tür ve miktarlarında beslenmesi ve sisteme su ilave edilmesi gerekebilir. Bu gereklilik de bir ön arıtma/hazırlama olarak değerlendirilebilir.

2.7. Biyogaz Tesislerinin Avantajları ve Dezavantajları

Anaerobik fermantasyon prosesi ile biyogaz üretiminin çevresel açıdan, sağlık açısından ve sosyo-ekonomik açıdan sağladığı pek çok faydanın yanı sıra bazı riskleri de vardır. Biyogaz tesislerinin avantajları ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

2.7.1. Biyogaz tesislerinin avantajları

- Atıklar genel olarak doğal bozulmaya bırakılırlar. Böylece gerçekleşen kontrolsüz bozunma; toprak, su ve havanın büyük ölçüde kirlenmesine neden olur. Ancak biyogaz elde etme yolu ile atıkları enerji hammaddesi olarak kullanmak mümkündür.
- Biyogaz üretimi ile doğal halde atmosfere kendiliğinden salınan ve sera gazı etkisine neden olan emisyonların azalması sağlanır. Böylece Kyoto Protokolü sera gazı emisyonları şartlarının sağlanmasına destek olur.
- Depolama alanlarından atmosfere yayılan istenmeyen kokuların önlenmesi sağlanır.

- Hammadde olarak kullanılan atıkların normal şartlarda değerlendirilmesi için gerekli olan düzenli depolama ve bertaraf alanları ile arazi ve teknoloji maliyetleri azalır. Atık malzemelerden, sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm ilkeleri ile enerji elde edilir.
- Biyogaz üretimi sonucu elde edilen ısı ve elektriğin kullanımı ile, fosil kaynaklı enerji ihtiyacı azalır. Isı ve elektriğin satışı ile ekonomik fayda elde edilir.
- Biyogaz üretimi sonucu oluşan fermente atıklardan katı atıklar, arazide gübre ve toprak şartlandırıcısı olarak, sıvı atıklar ise sulamada kullanılabilir. Bu sayede gübre ve su için yapılan harcamalar azalır, mineral gübre kullanımına gerek kalmaz. Nutrient döngüsüne erişilir, nitrat süzülümü azalır. Yüzeysel ve yeraltı sularında oluşan nitrat kirliliği azalır. Oluşan fermente atıkların satılması halinde ekonomik fayda elde edilir.
- Aerobik proste giren 100 birim karbonun %42'si CO₂'te, %5'i atıksuda, %48'i çamurda birikirken, anaerobik proste giren 100 birim karbonun %76'sı CO₂ ve CH₄'te, %20'si atıksuda, %4'ü çamurda birikir (Deublein and Steinhauser, 2008). Böylece enerji eldesi için, oluşan gazlar daha fazla miktarda ve daha etkin şekilde kullanılır.
- Aerobik bozunmada CO₂ ve H₂O gibi düşük enerji bileşikleri oluşur. Büyük miktarda enerji havaya karışır, kaybolur (anaerobik prostenen 20 kat daha fazla). Anaerobik bozunmada ise yüksek enerjili ürünler oluşur. Bunlar diğer organizmalara nitruent sağlarlar (alkoller, organik asitler) ya da enerji olarak kullanılır (biyogaz) (Deublein and Steinhauser, 2008).
- Anaerobik arıtmada, diğer biyolojik yöntemler ile karşılaştırıldığında daha yüksek organik yükleme oranları ve daha az çamur oluşur (Bouallagui et al., 2005)
- Tesis çıkışında fermente atıklardaki patojenik organizma miktarında önemli azalma ve/veya komple aktivasyon kaybı sağlanır.
- Atık bertarafında daha sağlıklı ve hijyenik şartlar sağlanır.
- Geri dönüşüm sektöründe uzmanlık ve iş gücünün yaratılması sağlanır.
- Atıkların değerlendirilmesi nedeniyle, bölgenin/şehrin görüntüsü ve prestiji değişir.

- Tarlalarda kullanılabilen küçük ölçekli biyogaz tesisleri ile yeterli verimi alamayan ve kar elde edemeyen çiftçilere, biyogaz ek gelir sağlar.
- Tarlalar, ortak biyogaz tesisleri ile büyük ölçekli işletmeler haline gelebilir.

2.7.2. Biyogaz tesislerinin dezavantajları

Yukarıda tanımlanan pek çok avantajın yanı sıra biyogaz tesislerinin sözkonusu olabilecek dezavantajları şöyledir:

- Tesis işletimi sırasında oluşan biyogaz, yanıcı ve patlayıcıdır. Sistem işletim şartlarının çok dikkatli seçilmesi ve kontrolünün düzenli yapılması gerekir (Igoni et al., 2008).
- Atıklarda bulunması muhtemel patojen bakteriler nedeniyle, atıkların taşınması ve depolanması süresince hijyen koşullarına dikkat edilmelidir (Bouallagui et al., 2005).
- Seçilen atık türüne göre su tüketimi fazla olabilir.
- Fermantasyon sonrası oluşan çürütülmüş atığın gübre olarak kullanılması durumunda azot içeriğine, su ve toprakta kirliliğe neden olmaması için dikkat edilmelidir.
- Görsel kirliliğe ve gürültü kirliliğine neden olmamak için, tesis tasarım ve işletimi uygun şekilde ve doğru ekipmanlar kullanılarak yapılmalıdır.
- Atıkların depolama alanlarında bertarafı ile karşılaştırıldığında biyogaz tesislerinin ilk yatırım maliyetleri bazı bölgeler ve atık türleri için daha yüksek olabilir. Bu nedenle tesiste kullanılacak atık türü ve yer seçimi uygun şekilde yapılmalıdır.
- Biyogaz tesislerinin tasarımı ve işletimi için teknik bilgi gereklidir.
- Biyogaz tesislerinin kontrolü zorunludur.
- Özellikle çiftlik ölçekli biyogaz tesislerinde ilave maliyet ve iş gücü gereklidir.

2.8. AB ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyogaz Üretimi

2.8.1. AB’de yenilenebilir enerji kaynakları ve biyogaz üretimi

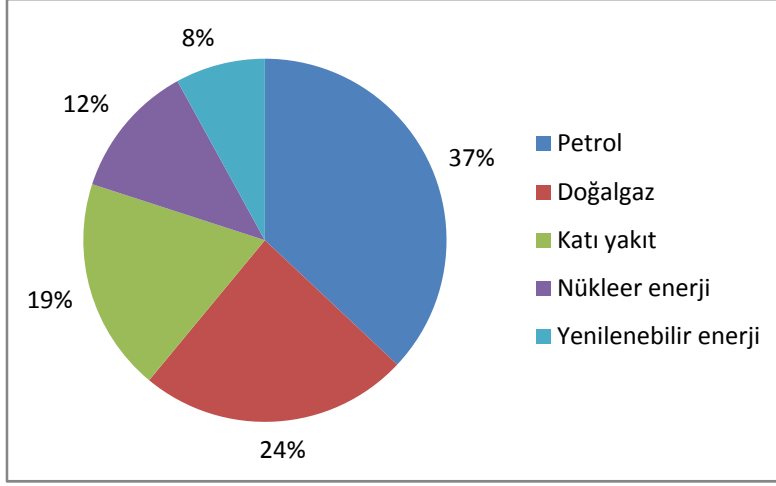
AB enerji politikası; arz güvenliğinin sağlanması, çevrenin korunması ve AB içinde rekabetin artırılması konularına odaklanmıştır. Bu politika ile tüketicilere yüksek kaliteli, kesintisiz, düşük maliyetli, çevreye saygılı ve sürdürülebilir gelişmeye

uygun enerji temin edilmesi hedeflenmektedir (Commission of the European Communities, 2006).

Doğalgaz ve petrol fiyatlarında yaşanan düzensiz artışlar, ithal bağımlılığının giderek artması, enerji piyasalarının ve jeopolitik faktörlerin değişmesi, çevre kirliliği ve iklim değişikliği sorunları, enerji sektöründe daha geniş katılımlı, uzun vadeli ve daha güçlü politikaların uygulanmasının önemini arttırmaktadır.

Bu bağlamda Ocak 2007 tarihinde Avrupa Komisyonu, enerji arz güvenliği, iklim değişikliği ve endüstriyel kalkınma konularına odaklanan entegre enerji ve iklim değişikliği önerilerini kapsayan “Avrupa İçin Enerji Politikası Raporu”nu yayınlamıştır. Bu rapor kapsamında, 2020 yılında enerji tüketiminin %20’sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) sağlanması, taşıtlarda kullanılan yakıtların (benzin ve dizel) içinde en az %10 oranında biyoyakıt bulunması, enerji verimliliğinin %20 artırılması ve sera gazı emisyonlarının 1990 yılına oranla en az %20 azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef AB 20-20-20 hedefi olarak da ifade edilmiştir (Commission of the European Communities, 2006). Belirlenen hedef kapsamında her bir üye ülkenin 2020 yılı için YEK kullanımındaki hedef oranı da ayrı ayrı saptanmıştır (Öner, 2009).

2006 yılı itibariyle AB-27’nin enerji tüketimi 1.825 Mtep civarında olup, bu tüketimi yaklaşık %33 oranla ulaştırma sektörü, %28 oranla sanayi sektörü ve %26’lık oranla hane tüketimi oluşturmaktadır (Öner, 2009). 2006 yılı için kullanılan enerji kaynakları incelendiğinde petrol, %37’lik oran ile birinci sırada yer alırken, onu %24 oranla doğalgaz, %19’den oranla katı yakıtlar, %12 oranla nükleer enerji ve %8 oranla yenilenebilir enerji izlemiştir (Öner, 2009), (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. AB enerji kaynakları kullanımı (Öner, 2009).

2006 yılında AB enerji üretimi ise 880 Mtep olup, üretimin %30'u nükleer enerjiden, %22'si katı yakıtlardan, %20'si doğalgazdan, %14'ü petrolden ve %14'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır (Öner, 2009).

AB'nin 2030 yılında enerji ihtiyacının %34'ünü petrolden, %27'sini doğalgazdan, %16'sını katı yakıtlardan, %12'sini YEK'ten ve %11'ini nükleer enerjiden karşılaması beklenmektedir (Öner, 2009).

AB'de yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogaz incelendiğinde; 2007 yılı itibariyle AB ülkelerinde gerçekleşen biyogazdan enerji üretiminin 2006 yılına göre %20,5 oranında ve yaklaşık 1 Mtep arttığı ve 5,9 Mtep değerine ulaştığı gözlenmiştir. 2006 ve 2007 yıllarında AB ülkelerinde gerçekleşen biyogazdan birincil enerji üretimi Çizelge 2.7'de yer almaktadır (EurObserv'ER, 2008).

Verilere göre, 2007 yılı itibariyle AB'de biyogaz üretiminde, %49,2 oranla düzenli depolama alanları ana kaynak olurken, bunu %15 oranla atıksu arıtma tesisleri ve %35,7 oranla özellikle tarımsal faaliyetlerin oluşturduğu diğer kaynaklar takip etmektedir. Diğer kaynakları özellikle biyogaz üretimi için özel olarak yetiştirilen mısır gibi enerji ürünleri oluşturmaktadır ve bu ürünler Avrupa'daki biyogaz üretiminin artışında önemli rol oynamaktadır.

Çizelge 2.7. AB ülkeler bazında biyogaz birincil enerji üretimi (EurObserv'ER, 2008).

Ülke	2006 (Ktep)				2007*(Ktep)			
	Düz. Depo gazı	Atık Çamur Gazı ¹	Diğer Biyogaz ²	Toplam	Düz. Depo gazı	Atık Çamur Gazı ¹	Diğer Biyogaz ²	Toplam
Almanya	383,2	270,2	1.011,7	1.665,1	416,4	270,2	1.696,5	2.383,1
İngiltere	1.318,5	180,0	-	1.498,5	1.433,1	191,1	-	1.624,2
İtalya	337,4	1,0	44,8	383,2	357,7	1,0	47,5	406,2
İspanya	251,3	48,6	19,8	319,7	259,6	49,1	21,3	330,0
Fransa	150,5	144,0	3,6	298,1	161,3	144,2	3,7	309,2
Hollanda	46,0	48,0	47,1	141,1	43,2	48,0	82,8	174,0
Avusturya	11,2	3,5	103,4	118,1	10,7	2,0	126,4	139,1
Danimarka	14,3	21,0	57,6	92,9	14,3	21,0	62,6	97,9
Belçika	51,0	17,6	9,1	77,7	48,1	18,0	12,5	78,6
Çek Cumh.	24,5	31,1	7,8	63,4	29,4	32,1	17,0	78,5
Polonya	18,9	43,1	0,5	62,5	19,1	43,0	0,5	62,6
Yunanistan	21,2	8,6	-	29,8	38,0	9,8	-	47,8
Finlandiya	26,1	10,4	-	36,5	26,4	10,3	-	36,7
İrlanda	25,4	5,1	1,8	32,3	23,9	7,9	1,7	33,5
İsveç	9,2	17,1	0,8	27,1	9,2	17,1	0,8	27,1
Maceristan	1,1	8,0	3,1	12,2	2,1	12,4	5,7	20,2
Portekiz	-	-	9,2	9,2	-	-	15,4	15,4
Slovenya	6,9	1,1	0,4	8,4	7,6	0,6	3,8	12,0
Lüksemburg	-	-	9,2	9,2	-	-	10,0	10,0
Slovakya	0,4	6,9	0,4	7,7	0,5	7,6	0,5	8,6
Estonya	3,1	1,1	-	4,2	3,1	1,1	-	4,2
Litvanya	-	1,5	0,5	2,0	1,6	0,8	-	2,4
Kıbrıs Rum	-	-	0,0	0,0	-	-	0,2	0,2
TOPLAM	2.700,2	867,9	1.330,8	4.898,9	2.905,3	887,3	2.108,9	5.901,5

1 Kentsel ve endüstriyel,

2 Merkezi olmayan tarımsal tesisler, belediye katı atık biyogaz tesisleri, merkezi kofermantasyon tesisleri

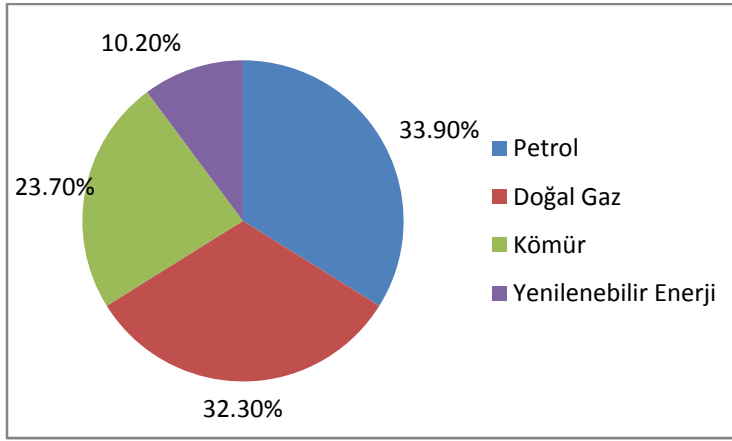
* Hesaplanan değerler

Yapılan çalışmalarda, sadece işlenen biyogaz değerlendirilmiş, tesislerde yakılan kısım değerlendirilmeye alınmamıştır.

2.8.2. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları ve biyogaz üretimi

Artan refah ve hızlı kalkınma sürecinde olan ülkemizin enerji talebi; nüfus artışı ve sanayileşmenin etkisi ile hızla artmaktadır. 2007 yılında yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji 10,8 Mtep’in üzerinde gerçekleşmiş olup bu değer Toplam Birincil Enerji Arzının %10,38’i civarındadır (Önenç, 2009).

Genel enerji tüketiminde %33,9 ile petrol en büyük payı almış olup bunu %32,3 ile doğalgaz, %23,7 ile kömür, geri kalan %10,2’lik bölümü ise yenilenebilir kaynaklar izlemiştir (Önenç, 2009), (Şekil 2.7). %10,2’lik yenilenebilir enerji kaynaklarında ise en büyük payı %5 ile biyokütle ve atık, %3,6 ile hidrolik, %1,1 ile jeotermal, %0,4 ile güneş ve %0,1 ile rüzgar enerjisi oluşturmaktadır.



Şekil 2.7. Türkiye genel enerji tüketimi dağılımı (Önenç, 2009)

Türkiye’de tarım ve hayvancılık önemli geçim kaynaklarındandır. Bu nedenle özellikle, sebze ve meyve atıkları, orman atıkları ile büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı hayvan gübresi atıkları Türkiye’nin biyogaz potansiyelinde önemli yer tutan atıklardır.

Türkiye’de biyogaz tesislerinde kullanılacak başlıca atık türleri; belediye atıkları, orman, tarım ve hayvancılık atıkları olarak sınıflandırılabilir.

Türkiye’nin atık potansiyelinin belirlenmesi için TÜİK tarafından yapılan bazı istatistiksel çalışmalar mevcuttur (TÜİK, 2006; 2008; 2009).

Bu çalışmalara göre; ülkemizde belediyelerden kaynaklanan organik atık miktarlarının belirlenmesinde 2006 yılı Belediye Katı Atık İstatistikleri Anketi

uygulanmış ve 3225 belediyenin 3115'inde katı atık hizmeti verildiği tespit edilmiştir. Katı atık hizmeti verilen belediyelerden, 2006 yılı yaz mevsiminde 12,75 milyon ton, kış mevsiminde 12,53 milyon ton olmak üzere toplam 25,28 milyon ton katı atık toplandığı belirlenmiştir (TUİK, 2006). Toplanan atıkların sadece %45'i düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmekte, kalanı vahşi olarak depolanmaktadır. Bu atıklar biyogaz eldesinde kullanılarak depo gazları geri kazanılabilir (Öztürk ve Karali, 2009).

Bunun yanı sıra Türkiye'nin biyogaz potansiyelinin ve yatırım yapılabilecek kaynak alanlarının belirlenmesi için Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından ülke genelinde daha kapsamlı olarak bölgesel atık miktarları saptanmış ve potansiyel biyokütle dağılım haritaları oluşturulmuştur (Ek 1). Böylece biyogaz enerjisine temel oluşturacak Türkiye'ye ait atık envanter çalışması hazırlanmıştır (Önenç, 2009). Bu çalışmada orman, tarım ve hayvancılık kaynaklı bölgesel atık miktarları belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmaya göre; 2009 yılı itibariyle Türkiye'nin orman kaynaklı toplam atık miktarı 4.787.541 ton olup, bu atıklardan elde edilebilecek biyogaz tesisi kapasitesi yaklaşık 600 MW'tır. Türkiye'nin orman kaynaklı biyokütle potansiyeli haritası Ek 1'de yer almaktadır (Önenç, 2009).

Çalışmada Türkiye'nin tarımsal kaynaklı atıkları, tarla ürünleri ve bahçe ürünleri olarak 2 gruba ayrılmıştır. Bölge bazında derlenen bilgiler Çizelge 2.8'de yer almaktadır (Önenç, 2009).

2009 yılı itibariyle Türkiye'nin tarımsal kaynaklı toplam atık miktarını tarla ürünleri için 11.766.995 ton ve bahçe ürünleri için 3.569.040 ton olmak üzere toplam 15.336.035 tondur. Bu atıklardan elde edilebilecek biyogaz tesisi kapasitesi yaklaşık 1.900 MW'tır (Önenç, 2009). Türkiye'nin tarımsal kaynaklı biyokütle potansiyeli ve yoğunluğu haritaları Ek 1'de yer almaktadır (Önenç, 2009).

Çizelge 2.8. Bölgesel bazda kullanılabilir tarımsal kaynaklı atık miktarları (Önenç, 2009).

Bölge	Kullanılabilir Atık (ton)					Toplam Isıl Değer (PJ)
	Tarla Ürünleri (ton)	Isıl Değeri (PJ)	Bahçe Ürünleri (ton)	Isıl Değeri (PJ)	Toplam (ton)	
Marmara Bölgesi	2.520.522	41	562.667	9,5	3.083.189	50,5
Ege Bölgesi	196.308	24,2	158.004	15,3	354.312	39,5
Akdeniz Bölgesi	3.119.832	57	429.939	8,0	3.549.771	65
Karadeniz Bölgesi	1.653.955	29,6	2.015.279	36,1	3.669.234	65,7
İç Anadolu Bölgesi	1.800.627	31,3	51.405	1,0	1.852.032	32,3
Doğu Anadolu Bölgesi	461.626	8,2	145.623	0,9	607.249	9,1
Güneydoğu Anadolu Bölgesi	2.014.125	37,1	206.123	4,0	2.220.248	41,1
TOPLAM	11.766.995	228,4	3.569.040	74,8	15.336.035	303,2

Yapılan çalışmada 2009 yılı itibariyle Türkiye’de toplam büyükbaş hayvan sayısı 11.054.000 adet, küçükbaş hayvan sayısı 38.030.000 adet ve kanatlı hayvan sayısı 243.510.453 adet olarak belirlenmiştir (Önenç, 2009). Herbir büyükbaş hayvandan 3,6 t/yıl, herbir küçükbaş hayvandan 0,7 t/yıl ve herbir kanatlı hayvandan 0,022 t/yıl yaş gübre oluştuğu ve her 1 ton büyükbaş hayvan gübresinden 33 m³/yıl, her 1 ton küçükbaş hayvan gübresinden 58 m³/yıl ve her 1 ton kanatlı hayvan gübresinden de 78 m³/yıl biyogaz oluştuğu kabul edilerek, Türkiye’nin hayvansal atıklardan elde edebileceği biyogaz miktarı hesabı Çizelge 2.9’da özetlenmiştir (Akbulut ve Dikici, 2004), (www.eie.gov.tr).

Çizelge 2.9. Türkiye'nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz üretimi (www.eie.gov.tr)

Hayvansal Atık Türü	Hayvan Sayısı (adet)	Yaş Gübre Miktarı (t/yıl)	Biyogaz Potansiyeli (m ³ /yıl)
Büyükbaş hayvan atığı	11.054.000	39.794.400	1.313.215.200
Küçükbaş hayvan atığı	38.030.000	26.621.000	1.544.018.000
Kanatlı hayvan atığı	243.510.453	5.357.230	417.863.937
TOPLAM	292.594.453	71.772.630	3.275.097.137

Türkiye'nin hayvan varlığı dağılımı, hayvansal atık miktarı dağılımı ve hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı dağılımı haritaları Ek 1'de yer almaktadır (Önenç, 2009).

Yukarıda belirlenen Türkiye'nin biyogaz potansiyelinden, özellikle elektrik üretiminde faydalanılabilir. Türkiye'nin elektrik enerjisi toplam kurulu kapasitesi 2009 yılı Mayıs ayı itibarıyla 42.248 MW olup, bunun yaklaşık %0,16'lık 67 MW'lık kısmını biyogaz ve çöp gazı tesisleri oluşturmaktadır (Gültekin, 2009).

Türkiye'nin enerji ihtiyacının 2005-2025 yılları arasında 3 kat artacağı tahmin edilmektedir (Kaygusuz ve Keleş, 2009). Toplam sera gazı emisyonları değerlendirildiğinde ise, fosil yakıtların kullanımı nedeniyle en çok emisyon üretiminin enerji sektöründe olduğu ve 2007 yılında 1990 yılına göre toplam emisyon miktarında %119 oranında artış olduğu gözlenmiştir (TUİK, 2007). Önümüzdeki yıllarda enerji ihtiyacının artacağı öngörüsüyle, mevcut fosil yakıtların kullanımı sürdükçe, emisyon miktarındaki artış da devam edecektir. Özellikle hammadde olarak halihazırda var olan ve kaynak niteliği taşıyan atıklardan biyogaz tesisleri ile enerji eldesi, Türkiye'nin bu soruna karşı değerlendirebileceği sürdürülebilir bir enerji teknolojisidir.

3. MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında öncelikle, proje yeri, amacı ve kofermantasyon işlemi ile biyogaz üretiminde kullanılacak atık tür ve miktarları hakkında bilgi verilmiş, tesis birimleri ve yerleşim planı özetlenmiştir.

Çalışmada kullanılan metot; teknik, ekonomik ve çevresel olarak üç ana bölüm altında toplanmıştır.

İlk bölüm olan teknik analizde atıklardan kofermantasyon işlemi ile oluşan biyogaz miktarları ile biyogaz tesisinde kullanılan birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminin verimi ve sağladığı enerji tasarrufu hesaplanmıştır.

İkinci bölüm olan ekonomik analizde tesis gelir ve giderleri belirlenerek geri ödeme süresi, net şimdiki değer analizi ve iç karlılık oranı analizleri yapılmıştır.

Üçüncü bölüm olan çevresel analizde ise oluşturulan senaryolar ile tesisin kurulması ve kurulmaması durumlarında oluşan sera gazı emisyon miktarları hesaplanarak karşılaştırma yoluyla net sera gazı analizi ve sera gazındaki azalma miktarı hesaplanmıştır.

3.1. Proje Bilgileri

Projenin amacı; bitkisel ve hayvansal kaynaklı atıklardan anaerobik kofermantasyon işlemi ile biyogaz elde edilmesi, böylece atıkların bertaraf edilmesinin yanı sıra tesiste kullanılan birleşik ısı ve güç (BIG) sistemi (kojenerasyon) yardımıyla enerji eldesinin sağlanmasıdır.

Bu amaçla kurulmakta olan pilot biyogaz enerji santrali, Kocaeli Büyükşehir Belediyesi önderliğinde Tübitak MAM, Kocaeli Üniversitesi, Ege Üniversitesi ve Akdeniz Üniversitesi işbirliği ile Kocaeli ilinde İZAYDAŞ bünyesinde gerçekleştirilmektedir.

Kocaeli ilinin yüzölçümü 3.505 km² ve 2007 yılı itibariyle nüfusu 1.437.926'dır. Nüfus bakımından Türkiye'nin 2. kalabalık ili, yüzölçümü bakımından ise en küçük 7. ili durumundadır.

3.2. Biyogaz Üretiminde Kullanılacak Materyal Tür ve Miktarının Belirlenmesi

Kofermantasyon yoluyla biyogaz üretiminde kullanılacak atıklar;

- Çimen atıkları,
- Hal ve marketlerden kaynaklanan yeşil sebze-meyve atıkları,
- Mezbaha atıkları,
- Tavuk gübresi atıkları ve
- Bölgedeki çiftliklerinden kaynaklanan büyükbaş hayvan gübresi atıklarıdır (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Projenin amacı tesisten minimum 350 kW'lık elektriksel güç elde etmektir. Bu nedenle biyogaz debisi hesabında, belirlenen bölgenin atık envanterinden sadece ihtiyaç duyulan elektriksel gücü elde etmek için gerekli olan ve laboratuvar şartlarında belirlenmiş atık miktarları değerlendirmeye alınmıştır (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008). Tesis yılda 8.000 saat, yaklaşık 333 gün çalışacak şekilde planlanmıştır (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008). Bölgenin toplam atık envanteri Ek 2'de yer almaktadır.

Tesiste kullanılacak atık tür ve miktarları Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Biyogaz tesisinde kullanılacak atık tür ve miktarları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008)

Atık Cinsi	Miktar (ton/yıl)	Miktar (ton/gün)
Çimen	5.383	16,165
Hal ve Market	1.870	5,615
Mezbaha	392	1,177
Tavuk Gübresi	1.779	5,342
Büyükbaş Hayvan Gübresi	319	0,958
TOPLAM	9.743	29,26

Tesiste kullanılacak atıkların analizlerle belirlenen kuru madde (KM), organik kuru madde (OKM), karbon (C) ve azot (N) miktarlarını içeren özellikleri Çizelge 3.2'de özetlenmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Çizelge 3.2. Tesiste kullanılacak atıkların özellikleri (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008)

Atık Cinsi	Miktar (ton/yıl)	Miktar (ton/gün)	KM (%)	OKM (%)	KM (ton/gün)	OKM (ton/gün)	C (%)	N (%)	C (ton/gün)	N (ton/gün)
Çiimen	5.383	16,165	26,01	89,91	4,205	3,780	35,97	2,277	1,513	0,096
Hal ve Market	1.870	5,615	8,97	91,65	0,504	0,462	42,05	2,13	0,212	0,011
Mezbaha	392	1,177	16,81	89,11	0,198	0,176	39,46	1,34	0,078	0,003
Tavuk Gübresi	1.779	5,342	71,92	37,10	3,842	1,425	40,32	5,64	1,549	0,217
Büyükbaş Gübresi	319	0,958	16,44	75,39	0,157	0,119	41,38	1,38	0,065	0,002

3.3. Tesis İşletim Parametreleri

Tesisin projede belirlenen optimum çalışma koşulları Çizelge 3.3'te özetlenmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Çizelge 3.3. Tesisin optimum çalışma koşulları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Parametre	Optimum Değer
Bekleme süresi	47 gün
Organik kuru madde oranı	%9
Fermentasyon sıcaklığı	Mezofilik: 37°C (35-40°C)
Çalışma süresi	8.000 saat (333 gün)

3.4. Tesis Birimleri

Tesisi oluşturan ana üniteler aşağıda tanımlanmıştır.

3.4.1. Atık hazırlama sistemleri

Atık hazırlama sistemi, atıkların fermentörlere gönderilmeden önce istenilen boyuta getirilmesini sağlayan biyogaz sistemi elemanıdır. Atık hazırlama sistemi birbirinden ayrı iki ana üniteden oluşmaktadır. Bunlar; parçalama ihtiyacı duyulan

malzemeler için parçalayıcı ve parçalama ihtiyacı duyulmayan malzemeler için besleyici ünitelerdir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

3.4.2. Fermantörler (reaktörler)

Biyogaz tesislerinde tesis kapasitesi ve hidrolik bekleme süresine bağlı olarak fermantörlerin büyüklükleri ve sayıları değişmektedir. Pilot tesis için iki adet fermantör tasarlanmıştır. Aynı boyuttaki bu fermantörlerin toplam hacmi $2*2400 \text{ m}^3$ ve net hacmi ise $2*2089 \text{ m}^3$ olarak planlanmış ve betondan imal edilmiştir. Fermantörler birbirine seri ve paralel bağlıdır. Fermantör içerisindeki materyalin homojen hale gelmesi için içerisine iki adet karıştırıcı yerleştirilmiştir. Ayrıca, fermantör iç sıcaklığını $35-40^\circ\text{C}$ 'de sıcaklıkta tutmak için içerisine ısıtıcılar yerleştirilmiş ve fermantör izolasyon malzemesi ile kaplanmıştır (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

3.4.3. Gaz depolama membranı

Biyogaz tesisinde iki fermantör üzerine ayrı ayrı olmak üzere 700 m^3 hacminde tek katlı membran şeklinde gaz depolama üniteleri öngörülmüştür. Depo hacmi üretilen gazın sürekli olarak motor jeneratör grubuna sevk edilecek olması nedeniyle yaklaşık 16 saatlik gaz üretimini depolayabilecek büyüklükte seçilmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Tesiste kullanılan gaz depolama membranı boyutları ve özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Çizelge 3.4. Tek katlı gaz depolama membran boyutları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Teknik özellik	Değeri
Çalışma basıncı	8 mbar
Depo çapı	19,50 m
Üreteç üst kenarından itibaren göre depo yüksekliği	5,40 m
Sabitlenme kısmından itibaren depo çapı	19,70 m
Maksimum gaz iletim miktarı	250 m ³ /h
Maksimum gaz alma miktarı	250 m ³ /h
Maksimum rüzgar hızı:	150 km/h
Maksimum kar yükü	80 kg/m ²
Dış yüzey membranın taşıma kuvveti $\leq 58,0^\circ$	9,80 kN/m
Kenar çelik bant konstrüksiyonu taşıma kuvveti	15,63 kN/m

3.4.4. Organik gübre deposu

Fermantörlerde fermante olmuş nihai ürün hidrolik bekleme süresi kadar bekleyip, pompalar vasıtasıyla seperatöre gönderilir. Burada seperatör, nihai ürünün katı madde içeriğini %25-30'a çıkararak organik gübre deposuna, geriye kalan %3-6 katı madde içeriğindeki sıvı kısmı ise fermente atık (sıvı gübre) deposuna boşaltır. Pilot biyogaz tesisinde nihai gübre deposu hacmi için yaklaşık bir aylık fermente gübre depolama hacmi esas alınarak 1000 m³'lük hacim seçilmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

3.4.5. Birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) ünitesi

Kojenerasyon ünitesi, üretilen biyogazın elektriğe ve ısıya dönüştürüldüğü kısımdır. Fermantörden alınan biyogazın içeriğinde hacimsel olarak %50-65 CH₄, %35-45 CO₂, 500-2500 ppm H₂S, çok az miktarda diğer gazlar ve nem bulunur. Biyogazın içeriğindeki H₂S, nem ile birleşerek gaz motoru, boru hatları vb. mekanik parçalarda korozyona neden olmaktadır. Biyogaz, gaz motorunda kullanılmadan önce içeriğindeki H₂S ve nemin ayrıştırılması gerekmektedir. Pilot tesiste H₂S ayrıştırma işlemi için biyolojik kükürt giderme sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem için fermantör tavanına özel ahşap ünite monte edilmiştir. Fermantörlerin bu kısmına

belli oranlarda hava (O₂) verilerek kükürt giderme işlemi yapılacaktır. H₂S ve nemi ayrıştırılan biyogaz gaz motorlarında kullanılarak ısı ve elektrik elde edilir. Üretilen ısıнын bir kısmı fermantör içerisindeki materyallerin ısıtılmasında, geriye kalan kısmı ise konut vb. yerlerin ısıtılmasında kullanılabilir. Üretilen elektriğin büyük bir kısmı elektrik şebekelerine verilirken bir kısmı da tesisteki ekipmanların çalıştırılmasında değerlendirilebilir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

3.4.6. Geri besleme sistemi

Pilot tesiste, fermantör içindeki katı madde oranını ayarlayabilmek ve besleme materyallerindeki organik madde içeriğini maksimum oranda metana dönüştürebilmek için geri besleme tekniği kullanılacaktır. Geri besleme tekniği olarak; günde son depodan alınacak %6 katı madde içeriğindeki yaklaşık 51,5 m³ ince çamur 1. ve 2. fermantörlere geri beslenecektir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Tesiste ana ünitelerinin yanı sıra gaz boruları/valfleri ve bağlantı elemanları, pompalar, ısıtma sistemleri ve ısı transfer elemanları gibi yardımcı elemanlar da kullanılmıştır.

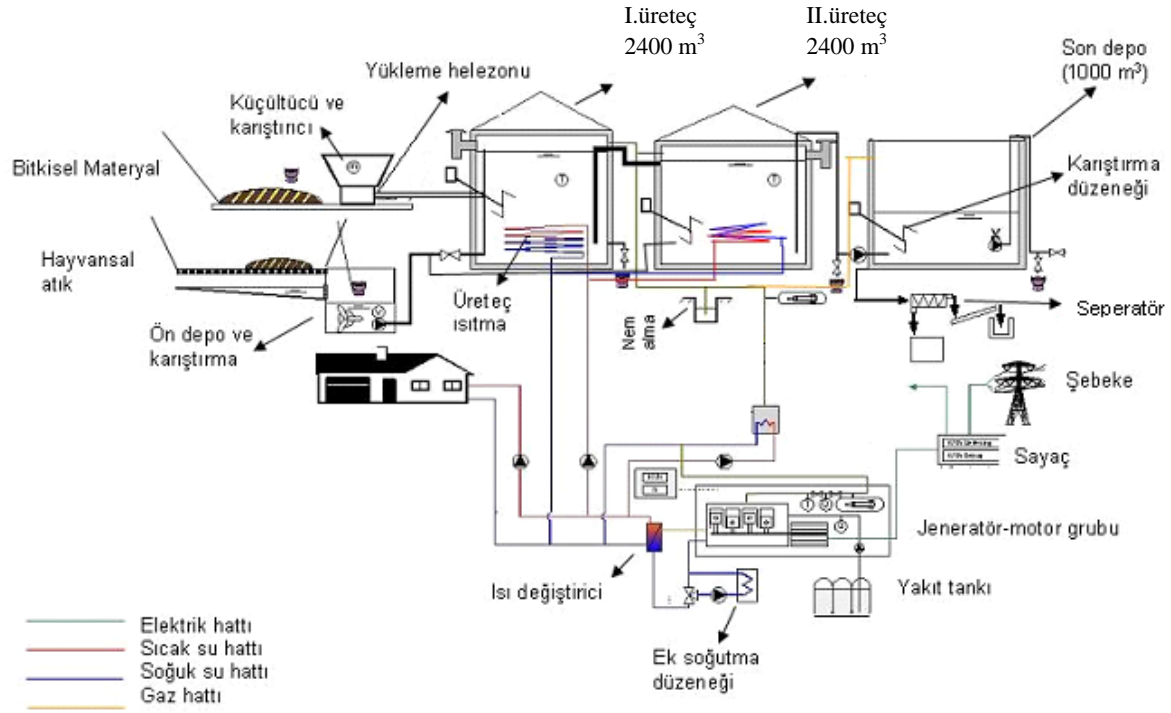
Biyogaz tesisini oluşturan üniteler ve kapasite bilgileri Çizelge 3.5'te özetlenmiştir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Çizelge 3.5. Biyogaz tesisi ünite ve kapasite bilgileri (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Ünite Adı	Tanım ve Kapasite
Fermantörler	2 adet birbirine seri ve paralel bağlı Kapasite: 2*2.400 m ³ brüt, 2*2.089 m ³ net hacim Çap: 19,5 m Yükseklik: 8 m Duvar kalınlığı: 0,3 m
Bitkisel Atık Depoları	3 adet Kapasite: 2*24 m, 1*15 m boy En: 10 m Yükseklik: 4 m
Hayvansal Atık Depoları	5 adet Kapasite: 5*5 m boy En: 4 m Yükseklik: 2 m
Ön Depo	1 adet Kapasite: 100 m ³ Çap: 6 m Yükseklik: 4 m
Son Depo (Nihai Gübre Deposu)	1 adet Kapasite: 1000 m ³ Çap: 16 m Yükseklik: 5 m Duvar kalınlığı: 0,3 m
Geri Besleme Sistemi	Son depodan alınan %6 katılıktaki 51,5 m ³ hacmindeki ince çamurun reaktörlere nakli.
Gaz Arıtım Sistemi	2 adet Biyolojik H ₂ S giderimi Reaktör tavanına monteli O ₂ beslemeli özel ahşap sistem
Gaz Depolama Membranı	2 adet Kapasite: 2*700 m ³ Çap: 19,5 m Basınç: 8 mbar Üreteç üzerinde, tam kapatma şeklinde monteli

3.4.7. Biyogaz tesisi üniteleri ve yerleşim planı

Biyogaz tesisi üniteleri Şekil 3.1'de ve yerleşim planı Şekil 3.2'de yer almaktadır (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

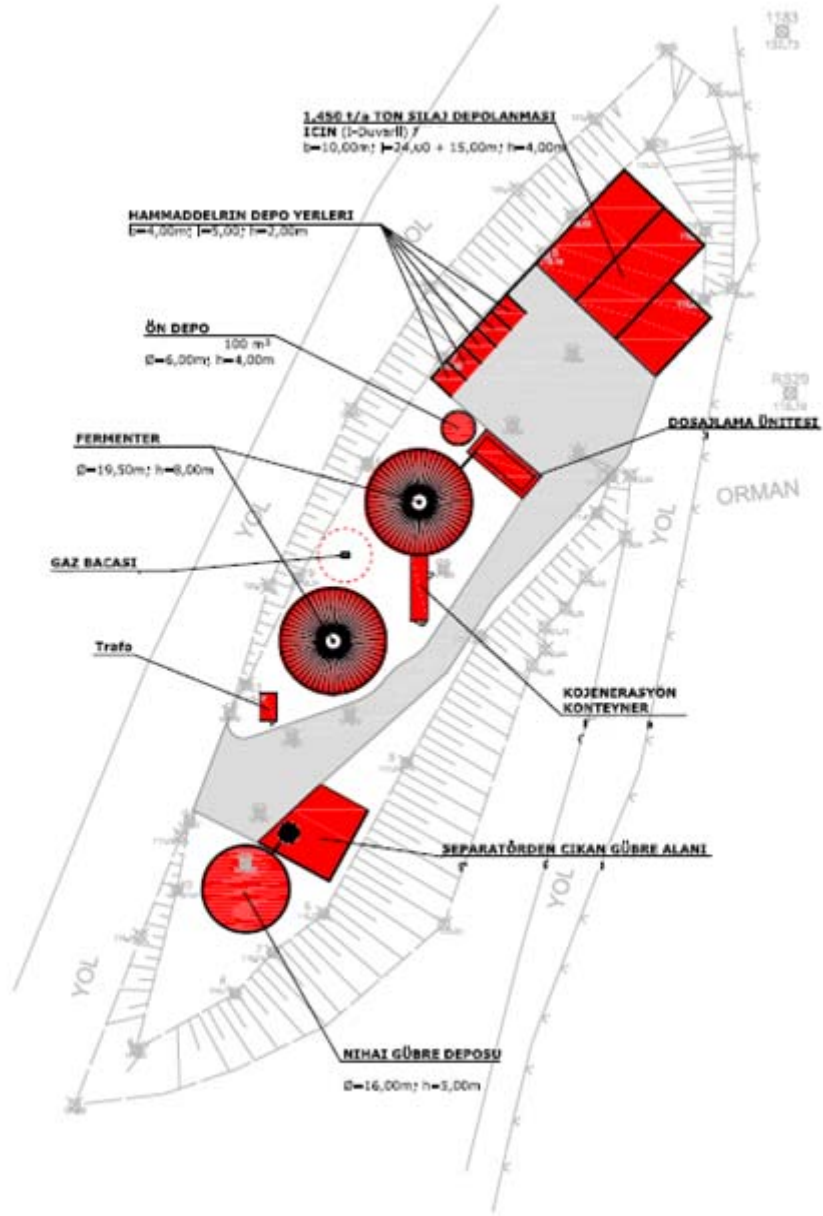


Şekil 3.1. Biyogaz tesisi üniteleri (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

3.4.8. Pilot tesis mevcut durumu

Tesis kurulum çalışmaları 6 Nisan 2009 tarihinde başlamış olup, bir yıl içinde tamamlanarak işletilmeye başlanacaktır.

Tesiste şu an itibariyle çimen silaj depo alanları, günlük atık depo alanları, 1 ve 2 nolu fermentörlerin betonarme inşaatları, nihai gübre ile diğer altyapı çalışmaları tamamlanmış, elektrik, mekanik ve enstrümantasyon çalışmalarına geçilmiştir. Tüm çalışmaların ise birkaç ay içinde tamamlanması hedeflenmektedir (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008). Tesise ait kazı ve inşaat çalışmalarını içeren fotoğraflar Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.2. Tesis yerleşim planı (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).



Şekil 3.3. Tesis temel kazı ve inşaat çalışmaları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

4. BİYOGAZ TESİSİNİN TEKNİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL ANALİZİ

4.1. Biyogaz Tesisinin Teknik Analizi

Biyogaz tesisinin teknik analizi kapsamında, öncelikle tesisin optimum çalışma koşullarına göre her bir atık türünden ve toplamda tesisten elde edilebilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca tesiste kullanılan birleşik ısı ve güç sisteminin enerji verimleri hesaplanmış ve tesise kazandırdığı fayda belirlenmiştir.

4.1.1. Biyogaz üretiminin hesabı

Atıklardan elde edilecek biyogaz miktarı, atığın türüne, atıktaki organik madde miktarına ve sıcaklık gibi yerel çevresel koşullara bağlıdır. Atıkların organik madde içeriği ve ortalama biyogaz üretim miktarı birbirinden farklı olduğundan, her bir atık türünden elde edilecek biyogaz miktarı ayrı ayrı hesaplanmış, bulunan değerler toplanıp, tesisten elde edilecek biyogaz miktarı belirlenmiştir.

Tesiste kullanılan farklı atıklardan elde edilecek ortalama biyogaz üretim miktarı ile ilgili aşağıdaki kabuller yapılmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Atık türlerine göre ortalama biyogaz üretim miktarları (Werner et al., 1989)

Atık Cinsi	Ortalama Biyogaz Üretim Miktarı (lt/kg OKM)
Çimen	450
Hal ve Market	470
Mezbaha	320
Tavuk Gübresi	390
Büyükbaş Gübresi	300

Tesiste kullanılan atık miktarlarından elde edilecek biyogaz miktarları hesabında aşağıdaki formüller kullanılmıştır (Werner et al., 1989).

$$G_y = OKM * mG_y \quad (4.1)$$

$$OKM = \text{atık miktarı} * KM \text{ yüzdesi} * OKM \text{ yüzdesi} \quad (4.2)$$

Burada;

G_y : Günlük üretilen biyogaz ($m^3/gün$),

OKM: Organik kuru madde miktarı (t OKM/gün),

mG_y : Organik kuru madde başına ortalama spesifik gaz üretimidir (l/kg OKM)

Buna göre her bir atık türünden elde edilecek biyogaz miktarları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan atık miktarları, kuru madde yüzdeleri ve organik kuru madde yüzdeleri Çizelge 3.2'den, organik kuru madde başına ortalama spesifik gaz üretimleri ise Çizelde 4.1'den alınmıştır.

1. Çimen atıkları:

$$OKM_{\text{ç}} = 16,165 * 0,2601 * 0,8991 = 3,780 \text{ tOKM/gün}$$

$$G_{y\text{ç}} = 3,780 * 450 = 1.701,00 \text{ m}^3/\text{gün}$$

2. Hal ve market atıkları:

$$OKM_{\text{hm}} = 5,615 * 0,0897 * 0,9165 = 0,462 \text{ tOKM/gün}$$

$$G_{y\text{hm}} = 0,462 * 470 = 217,14 \text{ m}^3/\text{gün}$$

3. Mezbaha atıkları:

$$OKM_{\text{m}} = 1.177 * 0,1681 * 0,8911 = 0,176 \text{ tOKM/gün}$$

$$G_{y\text{m}} = 0,176 * 320 = 56,32 \text{ m}^3/\text{gün}$$

4. Tavuk gübresi atıkları:

$$OKM_{\text{t}} = 5,342 * 0,7192 * 0,3710 = 1,425 \text{ tOKM/gün}$$

$$G_{y\text{t}} = 1,425 * 390 = 555,75 \text{ m}^3/\text{gün}$$

5. Büyükbaş hayvan gübresi atıkları:

$$OKM_{\text{b}} = 0,958 * 0,1644 * 0,7539 = 0,119 \text{ tOKM/gün}$$

$$G_{y\text{b}} = 0,119 * 300 = 35,7 \text{ m}^3/\text{gün}$$

Tesiste üretilen toplam biyogaz miktarı;

$$G_{y\text{top}} = G_{y\text{ç}} + G_{y\text{hm}} + G_{y\text{m}} + G_{y\text{t}} + G_{y\text{b}} \quad (4.3)$$

$$G_{y\text{top}} = 1.701 + 217,14 + 56,32 + 555,75 + 35,7 = 2.565,91 \text{ m}^3/\text{gün}$$

olarak bulunmuştur.

Tesis biyogaz hesabında kullanılan ortalama gaz üretim miktarları, 30°C ve 20 gün bekleme süresi şartları için kullanılan literatür değerleridir (Werner et al., 1989). Atıklardan elde edilecek biyogaz miktarı, tesis çalışma şartları olarak belirlenen 47 gün bekleme süresi ve 38°C çalışma sıcaklığı için düzeltilmelidir (Werner et al., 1989). Tesis şartlarında elde edilecek toplam biyogaz miktarı;

$$G_y(T,RT) = mG_y * f(T,RT) \quad (4.4)$$

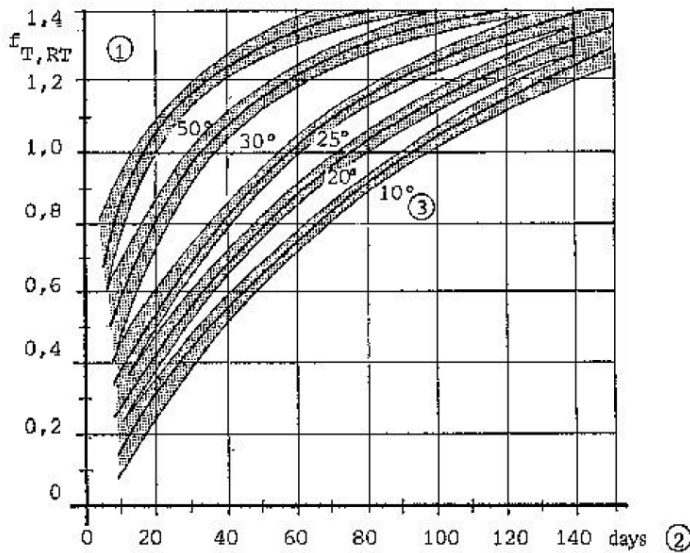
formülü ile hesaplanır (Werner et al., 1989). Burada;

$G_y(T,RT)$: Bekleme süresi ve sıcaklığa göre düzeltilmiş biyogaz üretim miktarı ($m^3/gün$),

mG_y : Uçucu katı madde başına ortalama spesifik gaz üretim miktarı (l/kg OKM),

$f(T,RT)$: Reaktör sıcaklık ve bekleme süresine bağlı gaz üretim çarpanıdır (Şekil 3.1).

Gaz üretim çarpanı, 47 gün bekleme süresi ve 38°C çalışma sıcaklığı için Şekil 4.1'den 1,1 olarak okunmuştur.



1: f_T, RT : Bağıl gaz üretimi, ortalama gaz üretimi çarpanı, 2: Bekleme süresi (gün),
3: Reaktör sıcaklığı (°C)

Şekil 4.1. Sıcaklık ve bekleme süresine bağlı gaz üretimi (f_T, RT) eğrisi (Werner et al., 1989)

Tüm atıklar için aynı bekleme süresi ve sıcaklık için düzeltme yapılacağından, her bir atık yerine toplam biyogaz üretimi üzerinden düzeltme yapılmıştır.

Buna göre düzeltilmiş biyogaz üretim miktarı;

$$G_y(T,RT) = 2.565,91 * 1,1 = 2.823 \text{ m}^3/\text{gün}$$

olarak hesaplanmıştır. Bulunan değerler Çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Atıklardan üretilen biyogaz miktarları

Atık Cinsi	Üretilen Biyogaz Miktarı (m ³ /gün)
Çimen	1.701,00
Hal ve Market	217,14
Mezbaha	56,32
Tavuk Gübresi	555,75
Büyükbaş Gübresi	35,70
Toplam Biyogaz Üretimi	2.565,91
Düzeltilmiş Biyogaz Üretimi	2.823

Tesis çalışma süresi göz önüne alındığında, elde edilecek yıllık biyogaz miktarı;

$$\text{Yıllık biyogaz üretimi} = 2.823 \text{ m}^3/\text{gün} * 333 \text{ gün/yıl} = 940.059 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

4.1.2. Birleşik ısı ve güç sisteminin verim hesapları

Biyogaz tesislerinde daha önce de ifade edildiği gibi birleşik ısı ve güç sistemleri kullanılarak ısı ve/veya elektrik enerjisi elde edilir.

Birleşik ısı ve güç (BIG) veya diğer adıyla kojenerasyon sistemleri, termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları ile bağlantılıdır. Termodinamik, Yunanca ısı ve enerji kelimelerinin birleşmesinden oluşur. Enerji; ısı, ış, entropi ve ekserji ile ilgilenen bilim dalıdır.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumunu ifade eder. Bu yasaya göre enerji yoktan var edilemez ve yok edilemez, sadece bir şekilde diğerine dönüşür. Termodinamiğin ikinci yasasında ise bir ısı kaynağından alınan ısının tamamının eşit miktarda işe dönüşmesinin imkansız olduğu ifade edilir (Cengel and Boles, 2005). Bunun için; ısı ve güç arasında bir çevrim ve bu çevrim boyunca net ısı ve

iş alışverişi tanımlanmıştır. BIG sistemleri de ısı ve elektrik alışverişlerinin değerlendirildiği bir çevrimdir.

Yeni bir enerji kaynağı değerlendirilirken, önemli olan, kaynağın güç potansiyelidir. Bu da enerjinin faydalı işe dönüştürülebilir kısmıdır. Enerjinin geri kalan kısmı ise atık enerji olarak ifade edilebilir. Bu nedenle belirlenen bölge ve kullanılacak kaynak için faydalı iş potansiyelinin belirlenmesi temel hedeftir. Bu ulaşılabilirlik ya da ulaşılabilir enerji, ekserji olarak tanımlanır (Cengel and Boles, 2005).

Ekserji aynı zamanda termodinamik bir sistemin ihtiva ettiği potansiyel enerjisinin, herhangi bir referans haline göre kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Birleşik ısı güç sistemlerinin verimlerinin değerlendirilmesinde elektrik, ısı ve yakıt enerjisi verimleri ve BIG sistemi performansı, termodinamiğin ilk yasasına göre belirlenir. Tesis performansının diğer tesisler ile karşılaştırıldığı ekserji kaynaklı verim ise ikinci yasanın değerlendirilmesini sağlar (Ertesvag, 2007).

Bu bölümde biyogaz tesisinde birleşik ısı ve güç sisteminin kullanılmasının tesis verimine ve enerji sarfiyatına etkisi incelenmiştir.

4.1.2.1. Tesisin enerji-ekserji verimi için kullanılan veriler

Biyogaz tesislerinden elde edilecek enerji, kullanılan atık türüne bağlıdır.

Biyogazdan elde edilebilecek enerji, diğer bir deyişle biyogazın ısı değeri, içerdiği metan oranı üzerinden hesaplanabilir. Tesisten elde edilecek biyogazın yapısında %55,5 CH₄ ve %44,5 CO₂ olduğu ve CH₄ ısı değerinin de 37,78 MJ/Nm³ olduğu kabul edilmiştir (Murphy et al., 2004). Buna göre biyogaz yapısındaki metan oranı ve metan ısı değeri gözönüne alındığında biyogaz ısı değeri;

$$\text{Biyogaz ısı değeri} = 37,78 \text{ MJ/Nm}^3 * 0,555 = 21 \text{ MJ/Nm}^3$$

olarak bulunmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Genel yaklaşım olarak, tesiste üretilecek biyogazdan sağlanabilecek enerji miktarı;} \\ \text{Tesisten üretilebilecek enerji} &= (2.823 \text{ m}^3/\text{gün} * 21 \text{ MJ/Nm}^3) / (3,6 \text{ MJ/kW} * 24 \text{ sa/gün}) \\ &= 686 \text{ kWsa} \end{aligned}$$

olarak hesaplanabilir.

Bu yaklaşımın yanı sıra literatürde; atıktaki organik madde içeriğinden (Kuhn, 1995), atık miktarı üzerinden (Murphy et al., 2004) ve toplam üretilen biyogaz debisi üzerinden (Tricase and Lombardi, 2009) elde edilebilecek ısı ve elektrik enerjisi hesabı ile ilgili pek çok kabule dayalı formülasyonlar mevcuttur. Ancak bu kabullerin tümü en fazla 2 ya da 3 atık türünün hammadde olarak kullanıldığı sistemler için yapılmıştır. Tez kapsamında değerlendirilen biyogaz tesisinde 5 farklı atık kofermantasyon işleminde kullanıldığından, elde edilebilecek enerji ile ilgili literatür kabulleri yeterli olmamıştır. Ayrıca tesis henüz devreye alınmadığından, tesis işletmesinde oluşan enerji bilgileri oluşmamıştır ve laboratuvar çalışmalarında, yapılan hesaptan daha farklı sonuçlar bulunmuştur (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme). Bu nedenlerle hesaplamalarda proje kapsamında yapılan laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilen enerji verileri kullanılmıştır.

Proje yürütücüsü Doç.Dr.Durmuş Kaya'dan alınan bilgilere göre hesaplamalarda kabul edilen tesis enerji verileri Çizelge 4.3'te özetlenmiştir. Tez kapsamındaki değerlendirmeler, bu verilere göre yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Tesis enerji verileri (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme)

Enerji Türü	Enerji Miktarı (kW)
Elektrik enerjisi üretimi (W)	350
Isı enerjisi üretimi(Q)	450
Hammadde eşdeğeri toplam enerji (yakıt enerjisi) (H)	876
Tesis enerji sarfiyatı (W _c)	60

4.1.2.2. Toplam enerji verimi

Alınan kullanılabilir enerjinin sisteme giren enerjiye oranı, toplam enerji verimi olarak ifade edilir. Toplam enerji verimi aynı zamanda BIG sistemi verimi, genel verim ve enerji kullanım faktörü olarak da adlandırılır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Isı ve elektrik üreten sistemler için toplam enerji verimi;

$$\eta_{\text{top}} = (W + Q) / H \quad (4.5)$$

formülü ile hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

η_{top} : toplam enerji verimi (%),

W: mekanik iş ya da üretilen elektrik miktarı (kW),

Q: iletilen ısı enerjisi miktarı (kW),

H: tesiste kullanılan hammaddenin enerji eşdeğeri ya da yakıtın düşük ısıtma değeridir (kW).

Buna göre toplam enerji verimi;

$$\eta_{top} = (350 + 450) / 876 = 0,91$$

bulunmuştur. Tesiste 876 kW hammadde eşdeğerine karşılık, 350 kW elektrik ve 450 kW ısı enerjisi üretilmesi durumunda, tesisin toplam enerji etkinliği %91 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2.3. Net enerji verimi

Tesisin çalışması sırasında tüketilen enerji miktarı da dikkate alınarak sistemin net enerji etkinliği belirlenebilir (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Buna göre sistemin net enerji verimi;

$$\eta_{net} = (W + Q) / (H + W_c) \quad (4.6)$$

şeklinde hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

η_{net} : net enerji verimi (%),

W_c : BIG sistemi elektrik sarfiyatıdır (kW).

$$\eta_{net} = (350 + 450) / (876 + 60) = 0,85$$

bulunmuştur. Buna göre sistem net enerji verimi %85'tir.

AB 2004/8/EC sayılı direktifinin Ek II (a) bendine göre; elektrik enerjisinin birleşik ısı ve güç üretiminden sağlanabilmesi için, net enerji veriminin en az %75 olması gerekir (Directive 2004/8/EC, 2004). Hesaplanan net enerji verimi %85 olarak bulunduğundan, tesis verimi uygundur.

4.1.2.4. Güç ve ısı üretim verimleri

Güç ve ısı verimleri, BIG sistemlerinde özellikle farklı metotların ve ayrı üretimlerin kalitelerinin değerlendirilmesinde önemlidir. BIG sistemlerinde giren enerji, ısı ve

elektrik enerjisine dönüşür. Tesisin tükettiği enerji de dikkate alınarak elektrik ve ısı için ayrı ayrı net enerji verimleri belirlenebilir. Elektrik ve ısı verimleri;

$$\eta_{el} = W / H \quad (4.7)$$

$$\eta_Q = Q / H \quad (4.8)$$

şeklinde bulunur (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

η_{el} : elektrik verimi (%),

η_Q : ısı verimidir (%).

$$\eta_{el} = 350 / 936 = 0,37$$

$$\eta_Q = 450 / 936 = 0,48$$

Buna göre tesis elektrik verimi %37, ısı verimi ise %48 olarak hesaplanmıştır.

Elektrik ve ısı verimlerinin toplamı aynı zamanda tesis toplam net enerji verimini verir. Dolayısıyla 4.1.2.3.'te hesaplanan tesis net enerji verimi (η_{net});

$$\eta_{net} = 0,37 + 0,48 = 0,85$$

şeklinde de bulunabilir.

4.1.2.5. Güç/ısı oranı

BIG tesislerinin etkinliğini tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir diğer gösterge ise güç/ısı oranıdır. Güç/ısı oranı, üretilen elektriğin buhar ile gönderilen ısı enerjisine oranıdır. Bu oran;

$$\sigma = W / Q = \eta_{el} / \eta_Q \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

σ : elektrik/ısı oranını ifade eder. Buna göre;

$$\sigma = 350 / 450 = 0,77$$

olarak bulunmuştur.

AB 2004/8/EC sayılı direktifinin Ek II (b) bendine göre; farklı teknolojiler için veri yokluğunda kullanılacak güç/ısı oranları tanımlanmıştır. İçten yanmalı gaz motorları için tanımlanan bu değer %75'tir (Directive 2004/8/EC, 2004).

Hesaplanan %77'lik güç/ısı oranı, tanımlanan orana oldukça yakın olduğundan, bulunan oran uygundur (Kılış, 2007).

4.1.2.6. Toplam ekserji verimi

Birleşik ısı ve güç sistemlerinde ekserji verimi, elektrik ve ısı arasındaki kalite farklılığının belirlenmesi amacıyla kullanılır. Elektrik veya mekanik enerjinin ekserjisi, enerjinin kendisine eşittir. Toplam ekserji verimi;

$$\eta_{ex} = (W + E_Q) / E_F \quad (4.10)$$

bağıntısı ile hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

η_{ex} : toplam ekserji verimi (%),

W: elektrik/mekanik enerjinin ekserjisi,

E_Q : ısı enerjisinin ekserjisi,

E_F : giren enerjinin ekserjisidir.

Isı enerjisinin ekserjisi;

$$E_Q = \alpha_Q * Q \quad (4.11)$$

Giren enerjinin ekserjisi;

$$E_F = \alpha_F * H \quad (4.12)$$

formülleri ile hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

α_Q : ısı enerjisinin ekserji-enerji oranıdır, 0,28 kabul edilmiştir (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007).

α_F : giren enerjinin ekserji-enerji oranıdır. 1,04-1,06 arasındadır. 1,05 kabul edilmiştir. (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007).

Bu kabullere göre;

$$E_Q = 0,28 * 450 = 126$$

$$E_F = 1,05 * 876 = 919,8$$

$$\eta_{ex} = (350 + 126) / 919,8 = 0,517$$

olarak bulunmuştur. Böylece tesis toplam ekserji verimi %51,7 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2.7. Net ekserji verimi

Net ekserji verimi;

$$\eta_{\text{exnet}} = (W + E_Q) / (E_F + W_c) \quad (4.13)$$

şeklinde hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

η_{exnet} : net ekserji verimidir (%).

Böylece;

$$\eta_{\text{exnet}} = (350 + 126) / (919,8 + 60) = 0,485$$

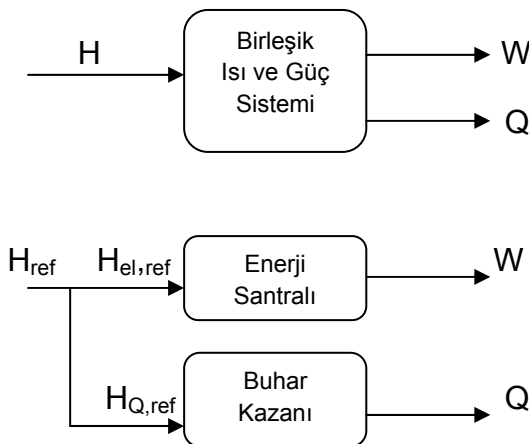
net ekserji verimi %48,5 olarak hesaplanmıştır.

4.1.2.8. Elektrik ve ısınin birlikte ve ayrı ayrı üretimi

Isı ve elektrik genel olarak ayrı ayrı üretilir. Isı, buhar ya da suyun taşıyıcı olarak kullanılmasıyla, ihtiyaç duyulan bölgenin yanında buhar kazanlarında üretilir. Elektrik ise genel olarak büyük ve merkezi enerji santrallerinde temin edilir. BIG (kojenerasyon) sistemleri ısı ve elektriği birlikte üretirler ve verimleri için ayrı üretim yapan sistemlerle karşılaştırılırlar (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Aynı miktar elektrik ve ısınin birlikte ve ayrı ayrı üretildiği proses şemaları, aşağıdaki gibidir (Şekil 4.2). Burada;

$H_{\text{el,ref}}$: referans sisteme elektrik üretimi için giren hammadde eşdeğeri enerji (kW),

$H_{\text{Q,ref}}$: referans sisteme ısı üretimi için giren hammadde eşdeğeri enerjidir (kW).



Şekil 4.2. Isı ve elektrik üretim şemaları (Ertesvag, 2007)

BIG sistemlerine giren toplam hammadde eşdeğeri enerji, tesiste oluşan sarfiyat ile birlikte ısı ve elektrik enerjisine dönüşür. Aynı ayrı üretim yapan sistemlerde ise elektrik ve ısı üretimi için hammaddeler ayrılır. BIG sistemleriyle karşılaştırılmak üzere aynı miktardaki ısı ve elektrik üretimini ayrı ayrı gerçekleştiren sistemler tanımlanır ve bu sistemler referans sistem olarak adlandırılır. Referans sistemlerin kullanılması ile oluşan enerji miktarının BIG sistemi ile karşılaştırılmasıyla BIG sisteminin kullanılması ile bir fayda elde edilip edilemeyeceği hesaplanabilir (Ertesvag, 2007).

4.1.2.9. Referans sistemin elektrik ve ısı enerjisi

Referans sistemlerin elektrik ve ısı verimleri kullanılarak, sistemlere ayrı ayrı giren enerji miktarları aşağıdaki gibi hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007):

$$H_{el,ref} = W / \eta_{el,ref} \quad (4.14)$$

$$H_{Q,ref} = Q / \eta_{Q,ref} \quad (4.15)$$

Formülde ve yukarıdaki şemada geçen kısaltmaların tanımları şöyledir;

$\eta_{el,ref}$: referans tesisin elektrik verimi, 0,5 kabul edilmiştir (Ertesvag, 2007).

$\eta_{Q,ref}$: referans tesisin ısı verimidir, 0,9 kabul edilmiştir (Ertesvag, 2007).

$$H_{el,ref} = 350 / 0,5 = 700 \text{ kW}$$

$$H_{Q,ref} = 450 / 0,9 = 500 \text{ kW}$$

Referans sistemin ısı ve elektrik enerjisi toplamları, sistemin toplam yakıt enerji değerini gösterir. Böylece;

$$H_{ref} = H_{el,ref} + H_{Q,ref} \quad (4.16)$$

$$H_{ref} = 700 + 500 = 1.200 \text{ kW}$$

olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla aynı miktardaki elektrik ve ısıyı referans tesislerde ayrı ayrı üretmek için gerekli yakıt enerjisi miktarı 1200 kW olarak bulunmuştur.

4.1.2.10. Birincil enerji tasarrufu

BIG sistemlerinin elektrik ve ısıyı ayrı ayrı üreten sistemler yerine tercih edilmeleri, enerjiden tasarruf sağlamaları halinde sözkonusu olur. Referans tesislerde ayrı ayrı yapılan ısı ve güç üretiminin BIG sistemleri ile karşılaştırılmasında, enerji tasarrufu hesabı yapılır. Bu tasarruf, birincil enerji tasarrufu olarak adlandırılır ve ayrı ayrı üretim yapan sistemler yerine BIG sistemlerinin kullanılması halinde tasarruf edilen yakıt enerjisinin bir göstergesidir (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007).

Birincil Enerji Tasarrufu,

$$PES = H_{ref} - H \quad (4.17)$$

şeklinde hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

PES: birincil enerji tasarrufu'dur.

$$PES = 1.200 - 936 = 264 \text{ kW}$$

olarak bulunmuştur. Dolayısıyla aynı miktardaki elektrik ve ısıyı referans tesislerde ayrı ayrı üretmek yerine BIG sistemlerinin kullanılması ile 264kW enerji tasarrufu sağlanacağı hesaplanmıştır.

4.1.2.11. Bağlı birincil enerji tasarrufu

Bağlı birincil enerji tasarrufu, birleşik ısı ve güç sistemlerinin verimlerinin belirlenmesinde özellikle Belçika, İtalya ve Fransa yönetmeliklerinde ve ilgili AB direktifinde kullanılan bir göstergedir. Birincil enerji tasarrufunun referans tesislerde ayrı ayrı ısı ve güç üreten sistemlerin kullandığı yakıt enerjisine bölünmesi ile bağlı birincil enerji tasarrufu elde edilir (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Bağlı Birincil Enerji Tasarrufu;

$$RPES = PES / H_{ref} = 1 - (H / H_{ref}) \quad (4.18)$$

şeklinde hesaplanır (Ertesvag, 2007; Nesheim and Ertesvag, 2007). Burada;

RPES: bağlı birincil enerji tasarrufunu ifade eder.

$$RPES = 264 / 1.200 = 0,22$$

bulunmuştur. Böylece biyogaz tesisinde BIG sisteminin kullanılması ile %22 oranında bağıl birincil enerji tasarrufunun sağlanacağı hesaplanmıştır.

AB 2004/8/EC sayılı direktifinin Ek III (a) bendine göre; birincil enerji tasarrufu %10'un üzerinde olan sistemler, "yüksek verimli kojenerasyon" olarak adlandırılır (Directive 2004/8/EC, 2004). Birincil enerji tasarrufu %22 olarak hesaplandığından, sistem yüksek verimli olarak bulunur.

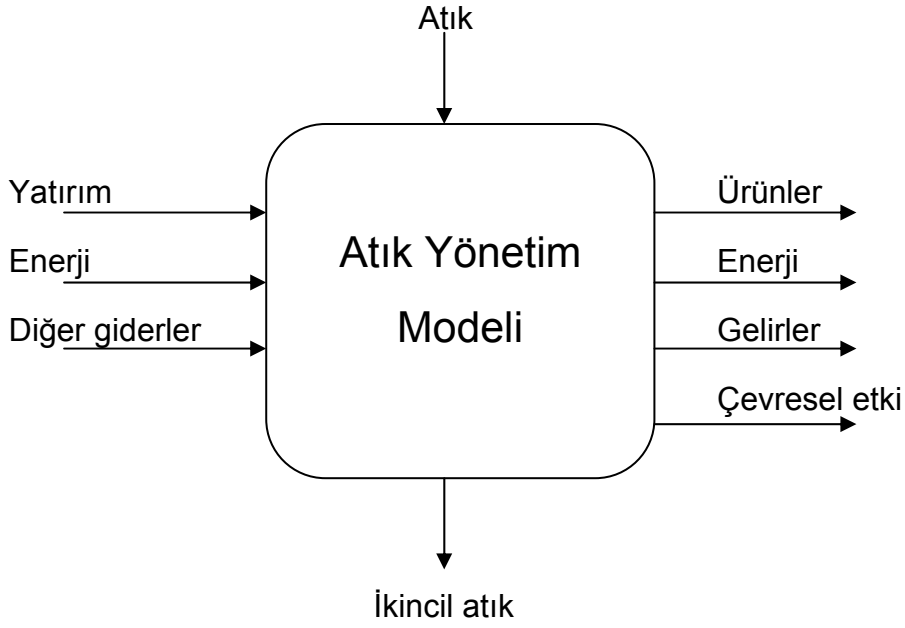
Yapılan hesaplamalarda birleşik ısı ve güç sisteminin verimi değerlendirilmiştir. Verim hesabında bir sistem olarak biyogaz üretimi ve enerji eldesi birlikte değerlendirilebilir. Çalışmada kullanılan tesis henüz işleme alınmadığından, biyogaz oluşumu ile ilgili gerçek veriler oluşmamıştır ve bu nedenle biyogaz üretimi hesabında literatür bilgileri kullanılmıştır. Tesis işleme alındıktan sonra biyogaz üretim ve BIG sistemi ile enerji üretimi aynı sistem sınırları içerisinde düşünülerek, sistemin genel verim hesabı yapılabilir.

4.2. Biyogaz Tesisinin Ekonomik Analizi

Ekonomik analiz, bir projeye ait belirlenen nakit giriş ve çıkışlar için gerekli finansal kaynak ihtiyacını, bu kaynağın nereden ve nasıl temin edileceğini saptayarak, proje önerisinin ekonomik açıdan uygun olup olmadığını değerlendirmeyi amaçlar (Gedik vd., 2005). Bu amaçla ekonomik analiz kapsamında yapılması gereken etüt çalışması aşağıdaki unsurlardan oluşur (Gedik vd., 2005):

- Proje ilk yatırım maliyetinin belirlenmesi,
- İşletmenin gelir ve gider tahminlerinin yapılması,
- Finansman kaynaklarının saptanması,
- İşletmenin karlılık durumu ile ilgili analizlerin yapılması.

Bir projenin ekonomik analizinde, projenin hayata geçmesi ile elde edilecek gelirler ve bunun için yapılması gereken harcamalar belirlenmelidir. Biyogaz tesisinde atıklardan enerji eldesi gerçekleşeceğinden, tesisin ekonomik analizi için bir atık yönetim modeli oluşturulmuş ve tesis için gelir ve maliyet unsurları belirlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Ekonomik analize esas atık yönetim modeli (Eriksson et al., 2002).

Atık yönetim modeline göre sistemde; kullanılan atıklar, tesis yatırımı, sarf edilen enerji ile planlama, projelendirme ve ar-ge çalışmaları gibi diğer giderler, maliyet unsurlarını oluşturur.

Sistemde, tesis çıkışında oluşan ürünler, üretilen enerji ve tesis işletilmesi ile oluşan ikincil atıktan elde edilen gelirler, toplam gelir unsurlarını oluşturur. Atık yönetim modeli kapsamında, tesisin çevresel açıdan önemi de değerlendirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında, yukarıda tanımlanan atık yönetim modeline göre, literatürde yer alan bilgiler kullanılarak, biyogaz tesisi etüt çalışması kapsamında yapılması gereken tesis gelir ve maliyetleri hesaplanmıştır.

Biyogaz tesisinin ekonomik analizine esas teşkil eden teknik veriler Çizelge 4.4'te yer almaktadır (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme).

Çizelge 4.4. Ekonomik analize esas teknik veriler (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme)

Teknik Veri	Değeri
Tesis çalışma süresi	8.000 sa (333 gün)
Net elektrik üretimi (kW)	350
Net ısı üretimi (kW)	450
Organik kuru gübre üretimi (ton/gün)	14
Organik sıvı gübre üretimi (ton/gün)	20,5
Tesis ekonomik ömrü (yıl)	20

4.2.1. Tesis maliyetini oluşturan unsurlar

Biyogaz tesisinin maliyetini oluşturan başlıca unsurlar;

- Proje planlama ve tasarım giderleri,
- Tesis ilk yatırım maliyeti,
- Tesis işletme giderleri olarak sıralanabilir.

4.2.1.1. Proje tasarım giderleri ve ilk yatırım maliyeti

Tesisin araştırma ve geliştirme çalışmaları, zemin, kazı ve dolgu, inşaat, mekanik ve enstrümantasyon projelendirme çalışmaları, teknik, yasal ve planlama için alınacak izinler, finans sağlamak amacı ile yapılacak araştırmalar, üretilecek elektriğin satışı için yapılacak bağlantılar gibi proje geliştirme giderleri ve tesis birim, enstrümantasyon ve bağlantılarının inşaatı ile kurulacak sahanın hazırlanması proje tasarım ve ilk yatırım maliyetini oluşturan unsurlardır.

Proje için gerekli olan finansal kaynak, özkaynaklardan karşılanacağından, herhangi bir kredilendirme işlemine ve masrafına gerek yoktur (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Tesis ilk yatırım maliyeti Tübitak MAM'da proje yürütücüsü Doç.Dr.Durmuş Kaya'dan alınan bilgilere göre; tüm planlama, projelendirme, arazi hazırlama işleri ve özellikle ar-ge çalışmaları dahil olmak üzere 1.700.000€'dur (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme, 2010 yılı).

4.2.1.2. Tesis işletme giderleri

Biyogaz tesisinin işletme giderleri, tesis kapasitesine, tasarım kriterlerine ve yerel koşullara bağlı olarak değişir.

Bir biyogaz tesisinin toplam işletme giderleri literatürde yer alan bilgilere göre, tesis ilk yatırım maliyetinin %2-5'i arasında değişmektedir (Biswas and Lucas, 1997; Engler et al., 1997; Axaopoulos and Panagakis, 2003). Ancak bu yaklaşım, çok genel bir yaklaşım olup, özellikle tesisten elde edilebilecek gelirlerle ilgili herhangi bir öngörü içermemektedir. Bu nedenle literatürde yer alan ve işletme giderlerini ayrı ayrı hesaplayan yaklaşım kullanılmıştır.

Bu yaklaşıma göre biyogaz tesisinin başlıca işletme giderleri,

- Fermantörün (reaktörün) kullanımı ve bakımı,
- Birleşik ısı ve güç sisteminin kullanımı ve bakımı,
- İş gücü,
- Sigorta ve vergi maliyetleri olarak sıralanabilir (Tricase and Lombardi, 2009)

Bu çalışmada incelenen pilot biyogaz tesisinin işletme giderleri, aşağıda ayrıntılı olarak hesaplanmıştır.

4.2.1.2.1. Fermantörün kullanımı ve bakımı

Fermantörün kullanım ve bakım maliyeti, birleşik ısı ve güç (BIG) sistemi hariç tesisin toplam yatırım maliyetinin %3'ü olarak kabul edilmiştir (Tricase and Lombardi, 2009). TÜBİTAK MAM'da proje yürütücüsü Doç.Dr.Durmuş Kaya'dan alınan bilgiye göre tesiste kullanılan BIG sisteminin maliyeti 350.000€'dur (proje yürütücüsü ile sözlü görüşme, 2010 yılı). Buna göre fermantörün kullanım ve bakım maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Fermantör kullanım ve bakım maliyeti (€/yıl)=

$$(\text{toplam yatırım gideri (€)} - \text{BIG sistemi yatırım gideri (€)}) * 0,03 \quad (4.19)$$

Fermantör kullanım ve bakım maliyeti = (1.700.000€ – 350.000€) * 0,03

$$= 40.500 \text{ €/yıl}$$

4.2.1.2.2. Birleşik ısı ve güç sisteminin kullanımı ve bakımı

BIG sisteminin kullanım ve bakım maliyeti, sistem ilk yatırım maliyetinin %17'si olarak kabul edilmiştir (Wulf et al., 2006). Bu verilere göre BIG sistemi kullanım ve bakım maliyeti şöyle hesaplanmıştır:

BIG kullanım ve bakım maliyeti (€/yıl)=BIG sistemi ilk yatırım maliyeti (€)*0,17 (4.20)

BIG kullanım ve bakım maliyeti = 350.000€ * 0,17 = 59.500 €/yıl

4.2.1.2.3. İş gücü

Tesisin işletilmesinde 1 beyaz 2 mavi yaka olmak üzere 3 kişinin çalışacağı, beyaz yakalı personelin aylık 1.500€, mavi yakalı personelin ise aylık 750€ maaş alacağı kabul edilmiştir. Buna göre tesis iş gücü maliyeti;

$$\text{İş gücü (€/yıl)} = \text{kişi sayısı} * 12 \text{ ay} * \text{maaş (€/ay)} \quad (4.21)$$

$\text{İş gücü} = (1 \text{ kişi} * 12 \text{ ay} * 1.500 \text{ €/kişi-ay}) + (2 \text{ kişi} * 12 \text{ ay} * 750 \text{ €/kişi-ay}) = 36.000 \text{ €/yıl}$
olarak bulunmuştur.

4.2.1.2.4. Sigorta ve vergiler

Tesisin sigorta ve vergi giderlerinin, ilk yatırım maliyetinin %5-%10'u arasında olduğu kabul edilmiş, %5 değeri seçilmiştir (Tricase and Lombardi, 2009). Sigorta ve vergilerin maliyeti aşağıdaki gibi bulunmuştur:

$$\text{Sigorta ve vergilerin maliyeti (€/yıl)} = \text{ilk yatırım maliyeti (€)} * 0,05 \quad (4.22)$$

$$\text{Sigorta ve vergilerin maliyeti (€/yıl)} = 1.700.000 \text{ €} * 0,05 = 85.000 \text{ €/yıl}$$

Tesiste kullanılacak atıklar, kaynaklarından bedelsiz olarak alınacaktır. Ayrıca biyogaz tesisinin bulunmadığı durumda, atıklar depolama için yine aynı yere taşınmaktadır. Dolayısıyla tesis için ilave bir hammadde satın alma ve taşıma gideri sözkonusu değildir.

Tesisin yıllık toplam işletme giderleri; fermantörün kullanımı ve bakımı, BIG sisteminin kullanımı ve bakımı, işgücü ve sigorta ve vergi maliyetlerinin toplamı ile oluşur. Bu değerlendirmelere göre tesisin yıllık toplam işletme gideri;

$$\text{Yıllık toplam işletme gideri (€/yıl)} = 40.500 + 59.500 + 36.000 + 85.000$$

$$\text{Yıllık toplam işletme gideri} = 221.000 \text{ €/yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

4.2.2. Tesis gelirlerini oluşturan unsurlar

Biyogaz tesisinin işletme sürecindeki başlıca gelir unsurları;

- Üretilen elektrik enerjisinin satışı,
- Oluşan ısı enerjisinin satışı,
- Organik gübrenin satışı,
- Yeşil sertifikanın satışı olarak sıralanabilir (Tricase and Lombardi, 2009).

Bu çalışmada incelenen pilot biyogaz tesisinin gelir unsurları, aşağıda ayrıntılı olarak hesaplanmıştır.

4.2.2.1. Elektrik satışı

Biyogaz tesislerinde üretilen elektrik satılarak gelir elde edilebilir. Üretilen elektriğin %20'sinin tesis ihtiyaçları için kullanılacağı, kalan %80'inin ise 0,07 €/kWsa bedelle satılacağı kabul edilmiştir (Murphy and McKeogh, 2006; Tsagarakis and Papadogiannis, 2006; Tricase and Lombardi, 2009; ASAT 2010). Üretilen elektriğin bir kısmının tüketim için ayrılması nedeniyle, işletme giderlerinde elektrik sarfiyatı ayrıca hesaplanmamıştır. Elektrik satışından elde edilmesi beklenen gelir;

$$\text{Elektrik satışı geliri (€/yıl)} = \text{tesis kapasitesi (kW)} * 0.8 * \text{çalışma saati (sa/yıl)} * \text{elektrik satış fiyatı (€/kWsa)} \quad (4.23)$$

Elektrik satışı geliri = 350 kW * 0.8 * 8.000 sa/yıl * 0,07 €/kWsa = 156.800 €/yıl olarak bulunmuştur.

4.2.2.2. Isı satışı

BIG sistemi ile oluşan ısının %30-50'sinin tesiste ısıtma amaçlı kullanılacağı bilinmektedir. Geri kalan fazla ısı satılarak gelir elde edilebilir (Seadi et al, 2008; Tricase and Lombardi, 2009). Üretilen ısının %30'unun tesis için kullanılacağı, kalan %70'lik kısmın ise 0,03 €/kWsa bedelle satılacağı kabul edilmiştir (Tricase and Lombardi, 2009). Buna göre ısı satışından elde edilmesi beklenen gelir, aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Isı satışı geliri (€/yıl)} = \text{tesis ısı kapasitesi (kW)} * 0,03 \text{ €/kWsa} * \text{çalışma saati (sa/yıl)} \quad (4.24)$$

Isı satışı geliri = 450 kW * 0,7 * 8.000 sa/yıl * 0,03 €/kWsa = 75.600 €/yıl

4.2.2.3. Organik gübre satışı

Tesiste fermantasyon sonucu katı ve sıvı halde atıklar oluşur. Bu atıklar fermente (çürütülmüş) atık olarak adlandırılır ve gübre olarak kullanılabilir. Tesis çıkışında üretilen katı haldeki fermente atık 14 t/gün kadardır ve bu organik gübrenin tonunun 30€ bedelle satılacağı kabul edilmiştir (Murphy and McKeogh, 2006; Murphy and Power, 2009; Tricase and Lombardi, 2009). Buna göre organik gübre satışından elde edilmesi beklenen gelir, aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Organik gübre satışı geliri (€/yıl)} = \text{organik gübre miktarı (t/gün)} * \text{gübre fiyatı (€/ton)} \quad (4.25)$$

$$\text{Organik gübre satışı geliri} = 14 \text{ t/gün} * 333 \text{ gün} * 30 \text{ €/t} = 139.860 \text{ €/yıl}$$

Hesaplama tesis çıkışında oluşan organik kuru gübre miktarı dikkate alınmıştır. Ayrıca oluşan sıvı gübre de gelir kaynağı olarak değerlendirilebilir.

4.2.2.4. Yeşil sertifika satışı

Yeşil sertifika, AB ilgili direktifinde tanımlanan “kaynak garantisi” ilkesinden yola çıkarak oluşturulmuştur (Directive 2009/28/EC). Kaynak garantisi, son kullanıcıya verilen enerji kısmının ya da miktarının yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiğini gösteren kanıt niteliğindeki elektronik bir belgedir. Direktif ile üye ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretiminde, üreticilerden belge talebi zorunlu hale getirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından ısıtma ve soğutmada faydalanmada ise belge talebi isteğe bırakılmıştır (Directive 2009/28/EC).

Yeşil sertifika, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen belli miktardaki elektrik üretimini tescil etmek amacıyla verilen bir sertifikadır (Ünal ve Gözen, 2007). Üreticiler, ürettikleri elektrik enerjisinin yanısıra, almış oldukları yeşil sertifikaları da satabilirler. Bu sertifikaları doğrudan alan ya da başka bir üreticiden satın alan üretici, yenilenebilir kaynakları kullandığını ve bu doğrultudaki kotayı doldurduğunu ispat etmiş olur. Pek çok Avrupa ülkesinde gönüllü ya da yasal olarak yapılan uygulamalarla, AB direktiflerine uyum sağlayabilmek, Kyoto protokolü şartlarını yerine getirebilmek, bu bağlamda sera gazı emisyonlarını azaltmak ve yenilenebilir enerji üretim potansiyelini arttırmak için yeşil sertifikalara önem verilmekte ve alım/satımı yapılmaktadır. Yasal düzenlemeler ile tedarikçilere, üreticilere ve tüketicilere belirlenen oranlarda yeşil sertifikalı enerji kullanım zorunluluğu getirilmektedir (Ünal ve Gözen, 2007). Türkiye’de yenilenebilir enerji sektöründe yeşil sertifika satışı henüz gündemde değildir. Ancak AB’ye uyum sürecinde ve Kyoto protokolü çerçevesinde yakın zamanda değerlendirilebileceği düşüncesiyle ve çevresel ve ekonomik olarak sağladığı fayda nedeniyle, tesis işletim gelirlerine dahil edilmiştir.

Yeşil sertifika satışı ile yapılan karbon ticaretinde, tesis kapasitesinin %95'inin değerlendirileceği ve yeşil sertifika ücretinin 0,02 €/kWsa olacağı kabul edilmiştir (Tricase and Lombardi, 2009). Buna göre tesisten yeşil sertifika satışı ile elde edilmesi beklenen gelir;

$$\text{Yeşil sertifika satışı geliri (€/yıl)} = \text{tesis kapasitesi (kW)} * 0.95 * \text{çalışma saati (sa/yıl)} * \text{yeşil sertifika ücreti (€/kWsa)} \quad (4.26)$$

Yeşil sertifika satışı geliri = 350 kW*0.95*8.000 sa/yıl*0,02 €/kWsa = 53.200 €/yıl şeklinde hesaplanmıştır.

Tesisin yıllık toplam işletme gelirleri; elektrik satışı, ısı satışı, organik gübre satışı ve yeşil sertifika satışı gelirlerinin toplamı ile oluşur. Buna göre tesisten yılda elde edilecek gelirler toplamı;

Yıllık toplam işletme geliri = 156.800 + 75.600 + 139.860 + 53.200 = 425.460 €/yıl olarak hesaplanmıştır.

4.2.3. Tesisten elde edilen yıllık kar

Tesisten elde edilen yıllık kar, tesis yıllık toplam geliri ile tesis yıllık toplam gideri arasındaki fark kadardır ve aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Tricase and Lombardi, 2009).;

$$\text{Tesisten elde edilen yıllık kar (€/yıl)} = \text{yıllık gelir (€/yıl)} - \text{yıllık gider (€/yıl)} \quad (4.27)$$

Tesisten elde edilen yıllık kar = 425.460 €/yıl – 221.000 €/yıl = 204.460 €/yıl

Buna göre tesisten elde edilecek yıllık kar 204.460€ olarak bulunmuştur.

Tesisin hesaplanan gelir ve gider dağılımı Çizelge 4.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.5. Tesisin hesaplanan gelir gider dağılımı

Ekonomik Analiz Bileşenleri	Tutarı
<i>Maliyetler</i>	
İlk yatırım maliyeti (€)	1.700.000
Fermenterin kullanımı ve bakımı (€/yıl)	40.500
BIG sisteminin kullanımı ve bakımı (€/yıl)	59.500
İş gücü (€/yıl)	36.000
Sigorta ve vergiler (€/yıl)	85.000
Yıllık toplam maliyet (€/yıl)	221.000
<i>Gelirler</i>	
Elektrik satışı (€/yıl)	156.800
Isı satışı (€/yıl)	75.600
Organik gübre satışı (€/yıl)	139.860
Yeşil sertifika satışı (€/yıl)	53.200
Yıllık toplam gelir (€/yıl)	425.460
<i>Yıllık kar (€/yıl)</i>	204.460

Tesis ekonomik ömrü 20 yıl kabul edilmiştir (Biswas and Lucas, 1997; Murphy and McKeogh, 2006; Mueller, 2007). Tesis inşaatının 1 yıl süreceği ve 2. yıldan itibaren tesisin işletileceği öngörülmektedir. Bu nedenle t=0 yılı için gelir yoktur ve gider olarak sadece ilk yatırım maliyeti hesaplara dahil edilir. Tesis ekonomik ömrü sonunda, tüm ekipman ve ünitelerin satılarak değerlendirileceği öngörülmüştür. Bu bedel, tesis hurda bedeli olarak adlandırılır ve bu proje için 100.000€ olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan gelir ve giderlere göre tesisten elde edilecek net gelir dağılımı Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. Tesisin hesaplanan net gelir dağılımı

Yıllar	Aşama	Yıllık Gelir (€)	Yıllık Maliyet (€)	Yıllık Net Gelir (€)
0	Satın alma, inşa ve montaj	0	1.700.000	-1.700.000
1	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
2	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
3	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
4	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
5	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
6	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
7	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
8	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
9	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
10	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
11	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
12	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
13	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
14	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
15	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
16	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
17	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
18	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
19	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
20	Yıllık gelir ve giderler	425.460	221.000	204.460
20	Hurda bedeli	100.000	0	100.000

4.2.4. Proje ekonomik değerlendirme ölçütlerinin belirlenmesi

Proje ekonomik değerlendirme ölçütleri, projelerin hesaplanan fayda ve maliyetlerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılan matematiksel tekniklerdir. Hem tek bir projenin kabul edilebilirliğinin belirlenmesi, hem de birden fazla projenin kabul edilebilirliklerine göre öncelik sıralaması yapılabilmesi amacıyla pek çok ekonomik değerlendirme ölçütü geliştirilmiştir (Boardman et al., 2006).

Yatırım projelerinin değerlendirilmesinde literatürde 2 yöntem mevcuttur. Bunlardan ilki paranın zaman değerini gözönüne almayan statik yöntemler, ikincisi ise paranın zaman değerini göz önüne alan dinamik yöntemlerdir (Gedik vd., 2005).

Statik yöntemlerde değerlendirme bir dönem ile sınırlıdır ve maliyet ve gelirlere dayanır. Yöntemde, paranın zaman değerinin gözönüne alınmaması önemli bir

dezavantajdır. En çok kullanılan statik yöntemler, geri ödeme süresi yöntemi ve karlılık oranı yöntemidir (Boardman et al., 2006).

Bir yatırım projesinde yapılacak tüm harcamalar ve elde edilecek gelirler, genellikle bir yıl içerisinde gerçekleşmez, projenin faydalı ömrü boyunca oluşur. Farklı dönemlerde oluşan bu gelir ve giderler, aynı değerlerde olmaz. Projenin ekonomik ömrü süresince gelir ve giderlerde oluşan bu farklılık, aynı zaman diliminde değerlendirilerek giderilebilir. Paranın zaman değerini gözönüne alan bu dinamik yöntemler arasında en çok kullanılanları net bugünkü değer analizi, iç karlılık oranı analizi, fayda/maliyet oranı analizi ve yıllık eşdeğer maliyet oranı analizidir (Gedik vd., 2005).

Paranın zaman değerini dikkate alan yöntemlerin temel özellikleri şunlardır (Aytekin, 2005):

- Değerlendirme, yatırımın bütün ekonomik ömrünü kapsar,
- Değerlendirme, nakit giriş-çıkışlarına dayandırılır,
- Nakit giriş ve çıkışları aynı zaman düzeyine indirgenir.

Bu çalışma kapsamında projenin ekonomik analizinde, statik yöntemlerden geri ödeme süresi yöntemi ve dinamik yöntemlerden net bugünkü değer analizi ve iç karlılık oranı analizi kullanılmıştır (Boukis et al., 2009).

4.2.4.1. Tesis geri ödeme süresi

Geri ödeme süresi (GÖS), proje ilk yatırım maliyetinin geri kazanılması için gerekli olan süredir (Özdemir ve Parmaksızoğlu, 2003). Diğer bir deyişle bir proje için yapılacak yatırımların sözkonusu projeden sağlanacak gelirler ile ne kadar sürede ödeneceğinin belirlenmesi işlemidir. Biyogaz tesislerinin ekonomik olarak analizinde yaygın olarak kullanılan bir değerlendirme yöntemidir (Boukis et al., 2009; Morin et al., 2009; Tricase and Lombardi, 2009).

Geri ödeme süresi, tesisin ilk yatırım maliyetinin yıllık elde edilen kar bedeline bölünmesi ile bulunur (Gedik vd., 2005). Buna göre tesis geri ödeme süresi;

Tesis geri ödeme süresi (yıl)= ilk yatırım maliyeti (€) /

$$\text{tesisten elde edilen yıllık kar (€/yıl)} \quad (4.28)$$

formülü ile hesaplanır.

Tesis geri ödeme süresi = 1.700.000 € / 204.460 €/yıl = 8,31 yıl

olarak bulunmuştur.

Yapılan hesaplamalara göre biyogaz tesisinden yılda 204.460€ kar edileceği ve tesis geri ödemesinin 8,31 yıl içerisinde tamamlanacağı hesaplanmıştır.

Yatırım projelerinin ekonomik değerlendirilmesinde geri ödeme süresi ile ilgili bazı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlardan birinde geri ödeme süresinin 3 yıldan fazla olması halinde dinamik yöntemlere başvurmanın faydalı olacağı vurgulanmıştır (Bursa Çevre Merkezi, 2003). Hem hesaplanan geri ödeme süresinin 3 yıldan fazla olması, hem de paranın zaman değerinin değerlendirilebilmesi için ekonomik analizde dinamik yöntemlerden net bugünkü değer (NBD) ve iç karlılık oranı (İKO) analizlerine yer verilmiştir.

4.2.4.2. Net bugünkü değer analizi

Net bugünkü değer (NBD) analizinde, projenin gelecek yıllar içindeki gelir akışı, belirlenen iskonto oranına göre güncel değerine çevrilir. Bir yatırımın net bugünkü değeri, belirli bir iskonto oranına göre indirgenmiş giderlerin toplamı ile indirgenmiş gelirlerin toplamı arasındaki farktır. Hesaplamalara, proje ekonomik ömrü sonunda varsa oluşan hurda bedeli de dahil edilir. Bir projenin bu yöntemle göre kabul edilebilmesi için net bugünkü değerinin sıfırdan büyük olması gerekmektedir. Alternatif projelerin seçiminde ise net bugünkü değeri en büyük olan projeye öncelik verilir. NBD pozitif ise, yatırımı gerçekleştirmek mantıklıdır; negatif ise değildir (Biswas and Lucas, 1997; Boardman et al., 2006).

NBD yönteminde projeye ilişkin hesaplanan tüm gelir ve giderler, belirlenen bir iskonto oranı ile bugünkü değerine (BD) çevrilir. BD hesaplamalarında bileşik faizi esas alan hesaplama yöntemi kullanılır (Boardman et al., 2006). Buna göre bugünkü değer;

$$BD = Y / (1+i)^n \quad (4.29)$$

olarak hesaplanır (Boardman et al., 2006). Burada;

Y: n dönem sonra gerçekleşen nakit akışı

n: dönem sayısı

i: iskonto oranıdır (%).

İskonto oranı, hesapla bulunabileceği gibi genel olarak kabul edilir. Elektrik üretimi yapan tesislerin ekonomik analizinde kullanılan iskonto oranı Türkiye için %10 olarak kabul edilmiştir (Axaopoulos and Panagakis, 2003; Sevilgen vd., 2005).

Eğer bir proje pek çok dönemden oluşuyorsa, bu dönemlerde oluşan gelir ve giderlerin bugünkü değerleri de ayrı ayrı hesaplanır (Boardman et al., 2006). Buna göre n dönem sonunda oluşan gelirler;

$$BD (B) = B_0 / (1+i)^0 + B_1 / (1+i)^1 + B_2 / (1+i)^2 + \dots + B_{n-1} / (1+i)^{n-1} + B_n / (1+i)^n \quad (4.30)$$

$$BD (B) = \sum_{t=0}^n B_t / (1+i)^t \quad (4.31)$$

şeklinde bulunur (Boardman et al., 2006). Benzer şekilde n dönem sonunda oluşan giderler;

$$BD (C) = C_0 / (1+i)^0 + C_1 / (1+i)^1 + C_2 / (1+i)^2 + \dots + C_{n-1} / (1+i)^{n-1} + C_n / (1+i)^n \quad (4.32)$$

$$BD (C) = \sum_{t=0}^n C_t / (1+i)^t \quad (4.33)$$

olarak bulunur (Boardman et al., 2006). Burada;

B_0 : Başlangıçtaki gelir,

B_t : $t=0, 1, 2, \dots, n$ yıllarında oluşan gelir,

C_0 : Başlangıçtaki gider,

C_t : $t=0, 1, 2, \dots, n$ yıllarında oluşan giderdir.

Bir projenin net bugünkü değeri, proje gelir ve giderinin bugünkü değerleri arasındaki farka eşittir. Buna göre NBD;

$$NBD = \sum_{t=0}^n B_t / (1+i)^t - \sum_{t=0}^n C_t / (1+i)^t \quad (4.34)$$

formülü ile hesaplanır (Boardman et al., 2006).

Projede hesaplanan gelir ve giderlerin bugünkü değerleri proje ömrü olan 20 yıl gözönüne alınarak aşağıdaki örnekler uyarınca hesaplanmıştır.

t=0 için projede sadece ilk yatırım maliyeti olan 1.700.000€ gider olarak mevcuttur. Tesis inşaat süresi 1 yıl olarak kabul edildiğinden ilk yıl projeden gelir eldesi yoktur.

t=2 yıl için tesisten elde edilecek gelirin bugünkü değeri;

$$BD (B) = 425.460 / (1+0,1)^2 = 351.620€$$

ve aynı şekilde 12. yılda tesiste oluşan yıllık giderin bugünkü değeri;

$$BD (C) = 221.000 / (1+0,1)^{12} = 70.417€$$

bulunmuştur.

Tesisin 20 yıl sonunda 100.000€'ya satılacağı kabul edilmiştir. Tesis hurda bedeli bugünkü değeri;

$$BD (B) = 100.000 / (1+0,1)^{20} = 14.864€$$

olarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalara göre, 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca tesisten elde edilecek gelirlerin bugünkü değerlerinin toplamı 3.637.045€ ve oluşan giderlerin bugünkü değerlerinin toplamı 3.581.499€ olarak bulunmuştur. Buna göre projenin net bugünkü değeri;

$$NBD = BD (B) - BD (C) = 3.637.045 - 3.581.499 = 55.546€$$

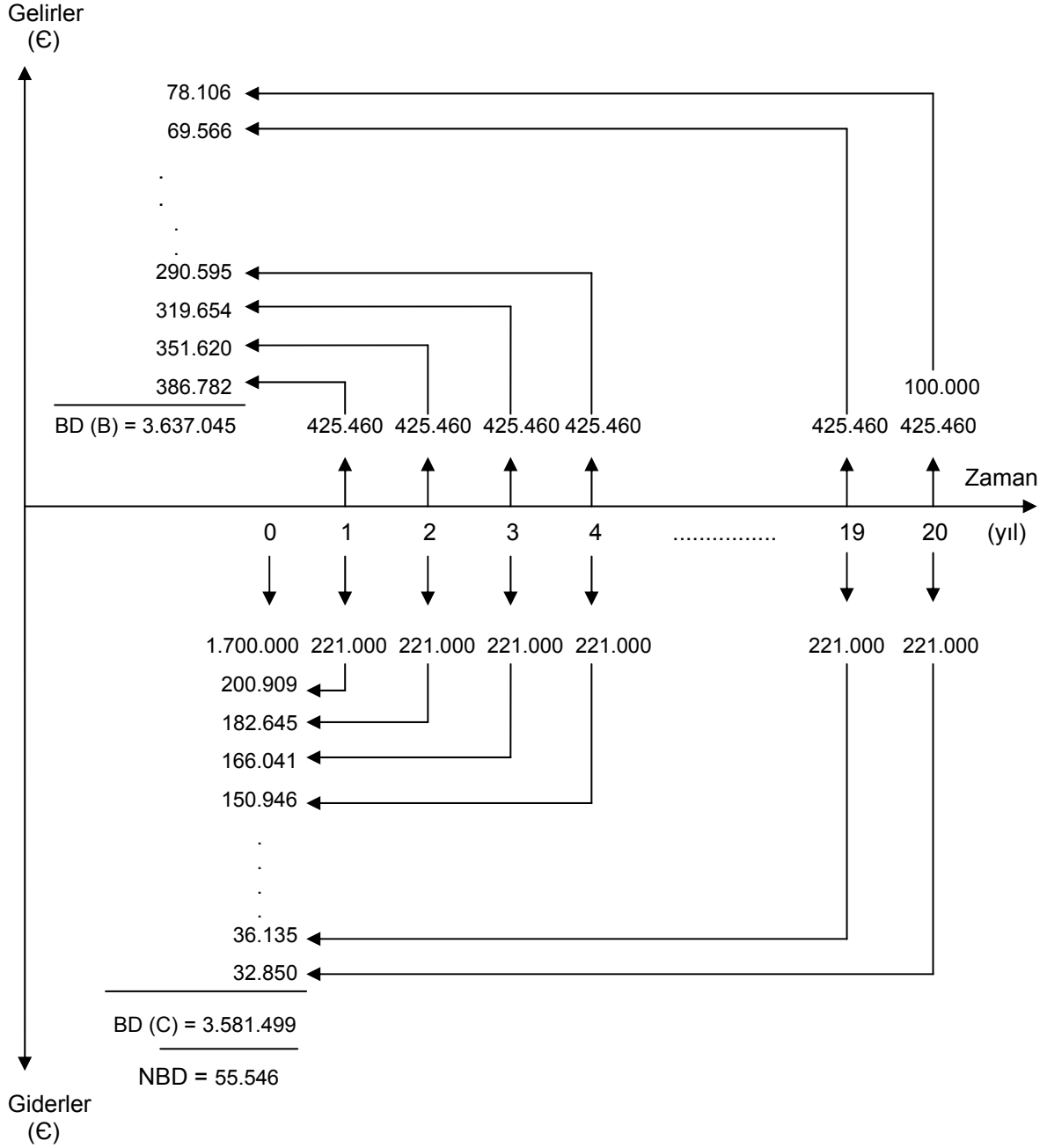
olarak hesaplanmıştır.

Projeden elde edilen brüt gelirlerin, projede oluşan giderlerin ve net gelirlerin bugünkü değerleri hesaplanmış ve Çizelge 4.7'de özetlenmiştir:

Çizelge 4.7. Projenin brüt gelir, gider ve net gelirlerinin bugünkü değerleri

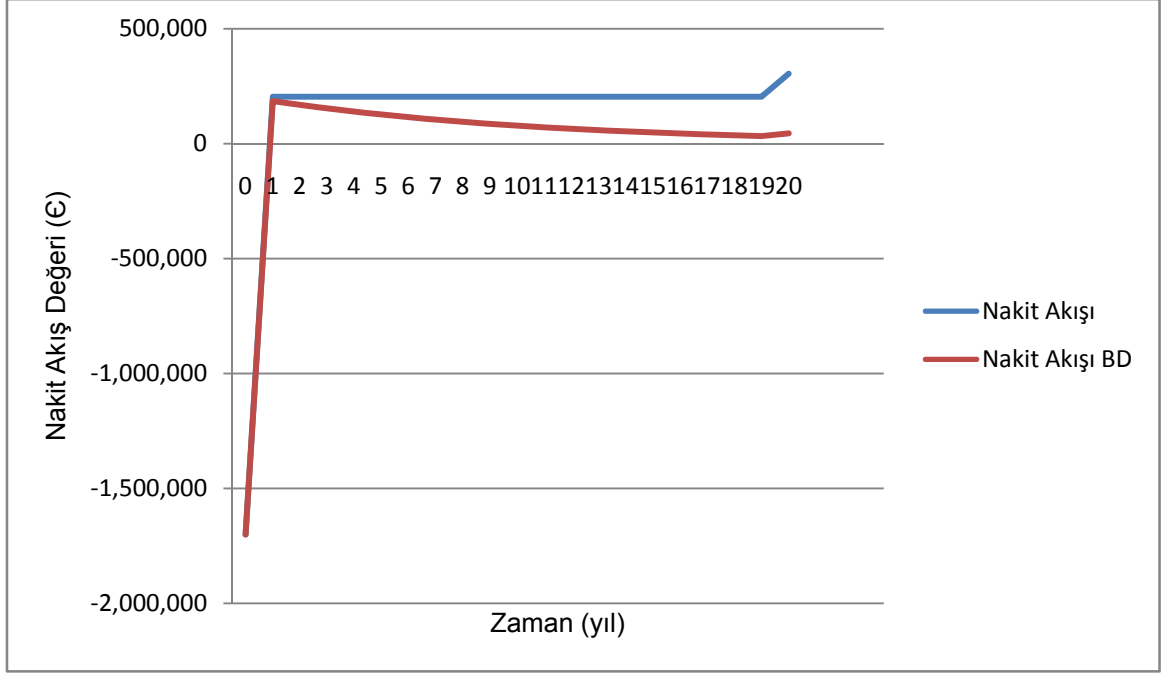
Zaman (yıl)	Brüt Gelirin BD (B) (€)	Giderin BD (C) (€)	Net Gelirin BD (€)
0	-	1.700.000	-1.700.000
1	386.782	200.909	185.873
2	351.620	182.645	168.975
3	319.654	166.041	153.613
4	290.595	150.946	139.649
5	264.177	137.224	126.953
6	240.161	124.749	115.412
7	218.328	113.408	104.920
8	198.480	103.098	95.382
9	180.437	93.726	86.711
10	164.033	85.205	78.828
11	149.121	77.459	71.662
12	135.565	70.417	65.148
13	123.241	64.016	59.225
14	112.037	58.196	53.841
15	101.852	52.906	48.946
16	92.592	48.096	44.496
17	84.175	43.724	40.451
18	76.523	39.749	36.774
19	69.566	36.135	33.431
20	63.242	32.850	30.392
20	14.864	-	14.864
Toplam	3.637.045	3.581.499	55.546

Proje ekonomik ömrü boyunca biyogaz tesisinin hesaplanan tüm gelir ve giderlerinin bugünkü değerlerinin dağılımı Şekil 4.4'te gösterilmiştir:



Şekil 4.4. Biyogaz tesisinin gelir ve giderlerinin bugünkü değerlerinin dağılımı

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.4'te hesaplanan değerlere istinaden, belirlenen %10 iskonto oranına göre tesis nakit akışı ve bugünkü değerlerinin Şekil 4.5'te gösterildiği şekilde gerçekleşmesi beklenmektedir.



Şekil 4.5. Hesaplanan tesis nakit akışı ve net bugünkü değerleri

NBD = 55.546€ > 0 olduğundan projenin yapımının ekonomik olarak uygunluğuna karar verilir. NBD formülünden anlaşılacağı gibi, NBD ile iskonto oranı ters orantılıdır. Bu nedenle kabul edilen %10 iskonto oranının azaltılması ile NBD değeri arttırılabilir.

4.2.4.3. İç karlılık oranı analizi

Bir yatırım projesinin net bugünkü değerini sıfıra eşitleyen iskonto oranı, iç karlılık oranı olarak ifade edilir (Boardman et al., 2006). İç karlılık oranı,

$$\text{İKO} = \sum_{t=0}^n B_t / (1+i)^t = \sum_{t=0}^n C_t / (1+i)^t \quad (4.35)$$

formülü ile bulunur (Boardman et al., 2006).

Genel olarak hesaplanan İKO, iskonto oranından büyük ise proje kabul edilir, küçük ise proje reddedilir (Boardman et al., 2006). Çünkü İKO'nun iskonto oranından büyük olması, projenin geri dönüşünden olan kazancın, yatırımın farklı şekilde değerlendirilmesinden fazla olduğu anlamındadır ve ancak bu fayda oluşuyorsa proje kabul edilebilir (Boardman et al., 2006).

Bir yatırımdan elde edilecek gelirlerin ve oluşan giderlerin bugünkü değerlerini birbirine eşitleyen iskonto oranı (i), deneme yanılma yolu ile bulunabilir.

NBD ile iskonto oranı ters orantılı olduğundan, kabul edilen %10 iskonto oranına istinaden yapılan hesaplara göre bulunan NBD değerinin sıfıra yaklaşması için, iskonto oranının arttırılması gerekir.

Seçilen farklı iskonto oranlarına (İO) göre hesaplanan NBD değerleri Çizelge 4.8'de özetlenmiştir:

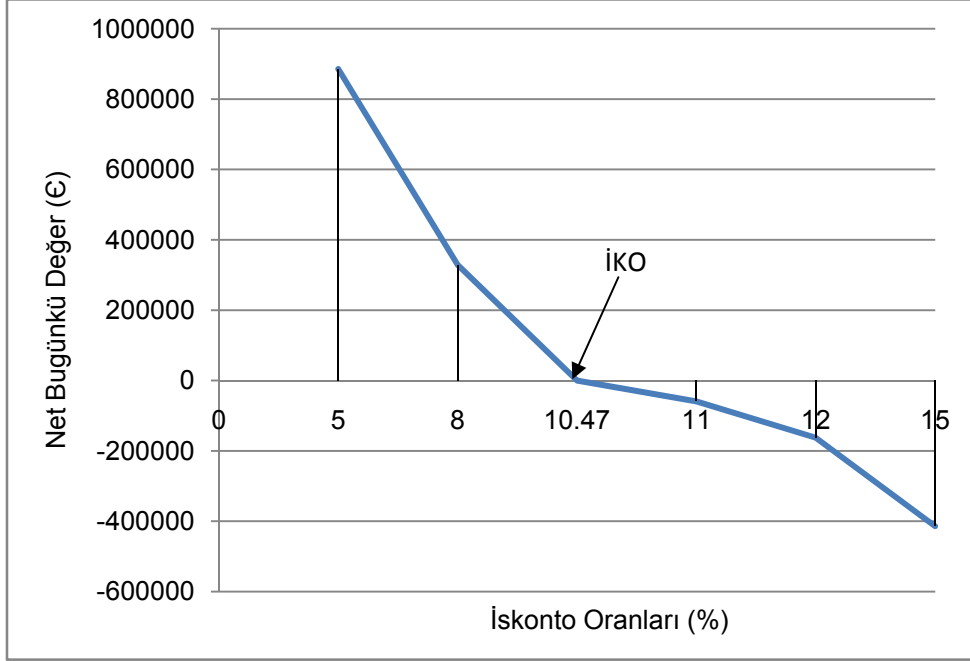
Çizelge 4.8. Farklı iskonto oranlarına göre hesaplanan net bugünkü değerler

Yıl	Yıllık Net Gelir (€)	İO %5 NBD (€)	İO %8 NBD (€)	İO %11 NBD (€)	İO %12 NBD (€)	İO%15 NBD (€)
0	-1.700.000	-1.700.000	-1.700.000	-1.700.000	-1.700.000	-1.700.000
1	204.406	194.723,81	189.314,81	184.198,20	182.553,57	177.791,30
2	204.406	185.451,25	175.291,50	165.944,32	162.994,26	154.601,13
3	204.406	176.620,24	162.306,94	149.499,39	145.530,59	134.435,77
4	204.406	168.209,75	150.284,20	134.684,13	129.938,03	116.900,67
5	204.406	160.199,76	139.152,04	121.337,06	116.016,09	101.652,76
6	204.406	152.571,20	128.844,48	109.312,67	103.585,80	88.393,70
7	204.406	145.305,90	119.300,45	98.479,88	92.487,32	76.864,09
8	204.406	138.386,58	110.463,38	88.720,61	82.577,96	66.838,34
9	204.406	131.796,74	102.280,90	79.928,48	73.730,33	58.120,29
10	204.406	125.520,70	94.704,54	72.007,64	65.830,65	50.539,39
11	204.406	119.543,53	87.689,39	64.871,75	58.777,36	43.947,29
12	204.406	113.850,98	81.193,88	58.443,01	52.479,79	38.215,04
13	204.406	108.429,50	75.179,52	52.651,36	46.856,95	33.230,47
14	204.406	103.266,19	69.610,66	47.433,66	41.836,57	28.896,06
15	204.406	98.348,76	64.454,32	42.733,03	37.354,08	25.127,01
16	204.406	93.665,48	59.679,92	38.498,22	33.351,85	21.849,57
17	204.406	89.205,22	55.259,19	34.683,08	29.778,44	18.999,63
18	204.406	84.957,35	51.165,92	31.246,02	26.587,89	16.521,41
19	204.406	80.911,76	47.375,85	28.149,57	23.739,19	14.366,45
20	204.406	77.058,82	43.866,53	25.359,97	21.195,71	12.492,56
20	100.000	37.688,95	21.454,82	12.403,39	10.366,68	6.110,03
Toplam	2.489.200	885.712,47	328.873,24	-59.414,56	-162.430,89	-414.107,04

Yapılan hesaplamalara göre net bugünkü değeri sıfıra eşitleyen tesis iç karlılık oranı %10,47 olarak bulunmuştur. Bulunan iç karlılık oranı, tesis için belirlenen

iskonto oranından büyük olduğundan, tesis yapımının ekonomik olarak uygunluğuna karar verilir.

Bulunan değerler Şekil 4.6'da özetlenmiştir:



Şekil 4.6. Biyogaz tesisi İO, İKO ve NBD değişimleri

4.3. Biyogaz Tesisinin Çevresel Analizi

Bir projenin planlanma döneminde projeden elde edilecek teknik ve ekonomik faydanın yanında, çevresel değerlendirmesi de yapılmalıdır. Projenin çevresel açıdan önemi incelenirken, projenin su, hava ve toprak ekosistemleri başta olmak üzere bölgedeki insan ve diğer canlıların sağlığına olan etkisi incelenmelidir.

Atıkların vahşi veya düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmeleri ile oluşan sorunlardan biri küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonları oluşturmalarıdır. Ayrıca yapılan istatistiksel çalışmalara göre Türkiye sera gazı üretiminde en büyük payı %77 ile enerji kaynaklı emisyonlar alırken, 2007 yılında 1990 yılına göre toplam sera gazı emisyonlarında %119 oranında artış olmuştur (TUİK, 2007). Bu nedenlerle bu çalışmada, pek çok unsurun incelenebileceği çevresel analiz kapsamında sera gazı emisyonları hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda biyogazdan oluşan sera gazında NO_x , SO_2 , CO ve partikül miktarları çok düşük seviyelerde olduğundan, ihmal edilmiştir (Börjesson and Berglund, 2006; 2007). Sera gazı emisyonlarının CO_2 ve CH_4 'ten oluştuğu

kabul edilmiş ve oluşan toplam sera gazı miktarı CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında sera gazı emisyonu toplam CO₂ emisyonu olarak da ifade edilmiştir.

Yapılan çevresel analizin amacı, tesiste atıklardan anaerobik fermantasyon ile biyogaz eldesinin sera gazında herhangi bir azalığa sebep olup olmayacağını belirlemesidir. Bu amaçla sera gazı miktarlarının belirlenebileceği 2 karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. Buna göre biyogaz tesisinin sera gazı analizi için;

- Net sera gazı üretimi ve
- Sera gazındaki azalma ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Net sera gazı üretimi hesabında, 2 farklı senaryo geliştirilmiştir. Bu senaryolara göre tesisin mevcut olma hali, olmama hali ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla atıklardan elde edilecek metanın yakılması halinde oluşan emisyonlar ile yakılmadan doğrudan atmosfere yayılan emisyonlar hesaplanmıştır.

İkinci bölüm olan sera gazı emisyonlarındaki azalma hesabında ise üretilen biyogaz; elektrik/ısı gücü/taşıyıcı yakıtı yerine kullanılması durumu ile karşılaştırılmıştır.

Tesisten elde edilecek biyogazın yapısında %55,5 CH₄ ve %44,5 CO₂ olduğu kabul edilmiştir. Hesaplamalarda CH₄ yoğunluğu 0,714kg/m³ ve CO₂ yoğunluğu 1,96 kg/m³, CH₄ ısı değeri ise 37,78 MJ/Nm³ olarak dikkate alınmıştır (Murphy et al., 2004). Biyogazın ısı değeri ise 4.1.2.1'de hesaplandığı üzere 21 MJ/Nm³ olarak kullanılmıştır.

4.3.1. Net sera gazı üretimi hesabı

Net sera gazı üretimi hesabında, öncelikle atıkların biyogaz tesisin olmaması halinde bertaraf edilmeleri ile oluşan sera gazı emisyonları hesaplanmış ve bu değer, atıkların biyogaz tesisinde değerlendirilmesiyle oluşan sera gazı emisyon miktarı ile karşılaştırılmıştır.

Proje yürütücüsü Doç.Dr.Durmuş Kaya'dan alınan bilgiye göre atıkların toplandıkları kaynakların; serilecekleri araziye, düzenli depolama alanına ve biyogaz tesisine olan uzaklıkları yaklaşık olarak birbirine eşittir (proje yürütücüsü

sözlü görüşme). Bu nedenle karşılaştırma ile oluşturulan senaryo hesaplarında atıkların kaynağından toplanması ve taşınması ile oluşan sera gazı emisyonları ihmal edilmiştir.

4.3.1.1. Tesisin mevcut olmaması halinde oluşan sera gazı emisyonları

Tesisin mevcut olmaması halinde, diğer bir deyişle biyogazdaki CH₄'ün yakılmaması halinde atmosfere yayılan depolama gazı miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Atmosfere yayılan emisyon miktarının hesaplanmasında, sera gazı emisyon hesaplamalarında genel olarak kullanıldığı üzere, eşdeğer CO₂ miktarının belirlenmesi esas alınmıştır. Bu nedenle CH₄'ün, eşdeğer CO₂ miktarı belirlenmiştir. CH₄'ün küresel ısınma potansiyeli CO₂'in 21 katıdır (Murphy et al., 2004; Murphy and McKeogh, 2006; Wulf et al., 2006). Sera gazı emisyon miktarının hesaplanmasında oluşabilecek CO, NO_x, SO₂ gibi diğer gazlar ihmal edilmiştir (Börjesson and Berglund, 2006).

Atmosfere yayılan 1 m³ depo gazında oluşan CH₄ ve CO₂ miktarları aşağıdaki gibi hesaplanır:

➤ CH₄ miktarı = 0,714 kg/m³ * 0,555 = 0,396 kgCH₄/m³

Eşdeğer CO₂ miktarı = 0,396 kgCH₄/m³ * 21 = 8,32 kgCO₂/m³

➤ CO₂ miktarı = 1,96 kg/m³ * 0,445 = 0,87 kgCO₂/m³

➤ 1 m³ depo gazından atmosfere yayılan toplam CO₂ miktarı;

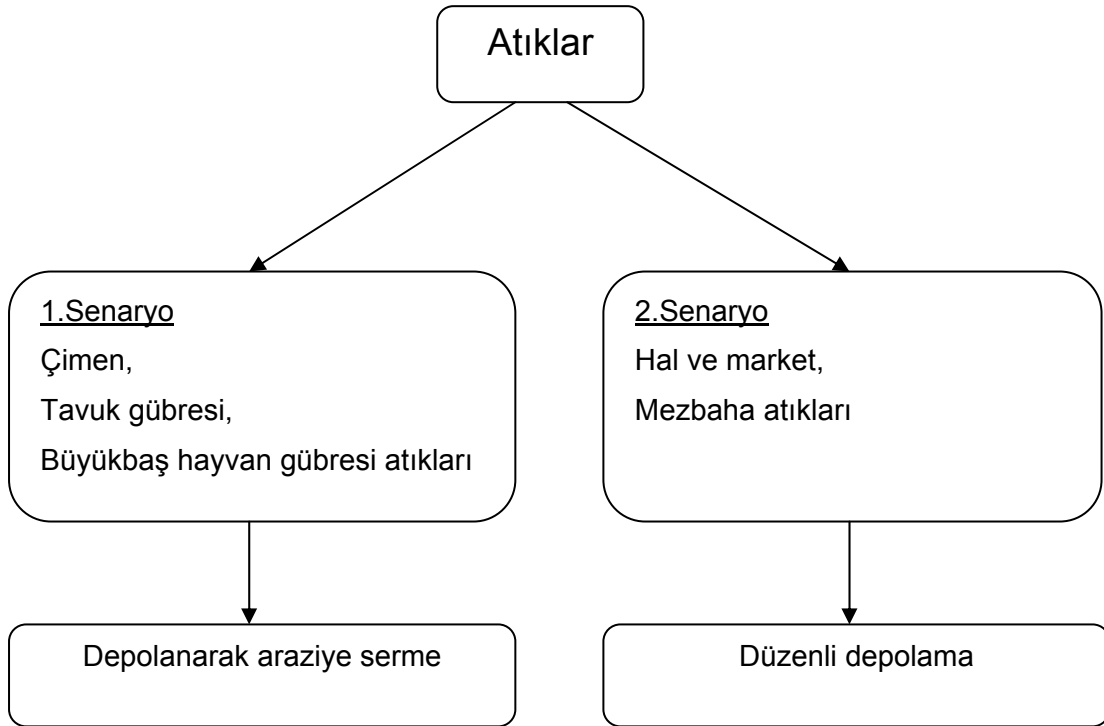
Atmosfere yayılan toplam CO₂ miktarı = 0,87 + 8,32

= **9,19 kgCO₂/m³** olarak bulunmuştur.

Böylece atıklardan oluşan CH₄'ün yakılmaması durumunda 1 m³ depo gazı atmosfere yayıldığında, 9,19 kgCO₂/m³ oluşması beklenmektedir.

Biyogaz üretimi yapılmaması durumunda, kullanılan atıkların bertarafı ile ilgili 2 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolara göre atıklardan;

- 1. senaryoda çimen, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarının kış aylarında depolanarak daha sonra araziye serileceği,
- 2. senaryoda hal ve market ile mezbaha atıklarının ise düzenli depolama alanına gönderileceği kabul edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Senaryo 1 ve 2'ye göre biyogaz tesisinin olmaması halinde atık bertarafı. Depolama ve araziye serme ile düzenli depolamada oluşan biyogaz miktarları, parçalanmış organik kuru madde (OKM) üzerinden hesaplanmıştır. Buna göre depolama ve araziye serme ile düzenli depolamada parçalanmış OKM miktarı hesabında;

Parçalanmış OKM miktarı = Biyokütle (t/yıl)*KM(%)*OKM(%)*parçalanma oranı (4.36) formülü kullanılmıştır.

Yapılan hesaplamalarda maksimum biyogaz potansiyeli, uçucu madde bozunmasının %65'i olarak, düzenli depolamada uzun dönemde uçucu katıların bozunma oranı da %65 olarak kabul edilmiştir (Murphy et al., 2004). Biyogaz hesabında 1kg organik kuru madde (OKM) parçalandığında 1m³ biyogaz oluşacağı kabul edilmiştir (Murphy and McKeogh, 2004).

1.senaryo:

1. senaryoda çimen, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarının kış aylarında depolanarak daha sonra araziye serileceği kabul edilmiştir.

Araziye serme işleminden önce özellikle kış aylarında biriktirme amacıyla atıkların kısa süre depolanması yaygın bir uygulamadır. Bu ön depolama ve araziye serme işlemleri sırasında oluşan sera gazı emisyonları ile ilgili aşağıdaki öngörüler dikkate alınmıştır (Murphy et al., 2004):

- Kış aylarında yapılacak 1 aylık depolamada potansiyel biyogaz üretiminin %10'unun,
- Kış aylarında yapılacak 2 aylık depolamada potansiyel biyogaz üretiminin %20'sinin,
- Nemli iklimlerde araziye serme uygulamaları için geri kalan biyogazın %10'unun oluştuğu kabul edilmiştir.

Bu öngörülere göre kış aylarında atıkların 2 ay süreyle depolanacağı ve ardından arazi uygulamasında kullanılacağı kabul edilmiştir. Bu nedenle hesaplamalar, 2 aylık depolamada potansiyel biyogaz üretiminin %20'sinin, araziye sermede ise geri kalan biyogazın %10'unun oluştuğu kabulü ile yapılmıştır.

Oluşturulan birinci senaryoya göre biyogaz tesisinin olmaması halinde çimen, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarının kış aylarında depolanıp ardından araziye serilmesi durumlarında oluşan sera gazı emisyonları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

1.senaryo:

Çimen atıkları:

$$\text{Parçalanmış OKM miktarı} = 5.383 \text{ t/yıl} * 0,2601 * 0,8991 * 0,65 = 818 \text{ t/yıl}$$

$$\text{Maksimum potansiyel biyogaz üretimi} = 818 \text{ t/yıl} * 1.000 \text{ m}^3/\text{t} = 818.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Depolamada oluşan biyogaz} = 818.000 \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,2 = 163.600 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Araziye sermede oluşan biyogaz} = (818.000 - 163.600) \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,1 = 65.440 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\begin{aligned} \text{Toplam oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} &= (163.600 + 65.440) \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \\ &= 2.105 \text{ tCO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

Tavuk gübresi atıkları:

$$\text{Parçalanmış OKM miktarı} = 1.779 \text{ t/yıl} * 0,7192 * 0,3710 * 0,65 = 309 \text{ t/yıl}$$

$$\text{Maksimum potansiyel biyogaz üretimi} = 309 \text{ t/yıl} * 1.000 \text{ m}^3/\text{t} = 309.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Depolamada oluşan biyogaz} = 309.000 \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,2 = 61.800 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Araziye sermede oluşan biyogaz} = (309.000 - 61.800) \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,1 = 24.720 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\begin{aligned} \text{Toplam oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} &= (61.800 + 24.720) \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \\ &= 795 \text{ tCO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

Büyükbaş hayvan gübresi atıkları:

$$\text{Parçalanmış OKM miktarı} = 319 \text{ t/yıl} * 0,1644 * 0,7539 * 0,65 = 26 \text{ t/yıl}$$

$$\text{Maksimum potansiyel biyogaz üretimi} = 26 \text{ t/yıl} * 1.000 \text{ m}^3/\text{t} = 26.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Depolamada oluşan biyogaz} = 26.000 \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,2 = 5.200 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\text{Araziye sermede oluşan biyogaz} = (26.000 - 5.200) \text{ m}^3/\text{yıl} * 0,1 = 2.080 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\begin{aligned} \text{Toplam oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} &= (5.200 + 2.080) \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \\ &= 67 \text{ tCO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

$$\text{Depolama/araziye sermede oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} = 2.105 + 795 + 67$$

$$= \mathbf{2.967 \text{ tCO}_2/\text{yıl}} \text{ bulunmuştur.}$$

Buna göre; biyogaz tesisinin olmaması halinde öngörülen ilk senaryoda çimen, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresi atıklarının depolanması ve araziye serilmesi ile toplam 2.967 tCO₂/yıl seragazı oluşumu hesaplanmıştır.

2. senaryo

2. senaryoda hal ve market ile mezbaha atıklarının tamamının düzenli depolama alanına gönderileceği kabul edilmiştir. Bu nedenle biyogaz hesabında toplam atık miktarı dikkate alınmıştır.

Oluşturulan ikinci senaryoya göre biyogaz tesisinin olmaması halinde hal ve market ile mezbaha atıklarının düzenli depolama alanında bertaraf edilmesi durumunda oluşan sera gazı emisyonları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

2.senaryo:

Hal-market atıkları:

$$\text{Parçalanmış OKM miktarı} = 1.870 \text{ t/yıl} * 0,0897 * 0,9165 * 0,65 = 100 \text{ t/yıl}$$

$$\text{Maksimum potansiyel biyogaz üretimi} = 100 \text{ t/yıl} * 1.000 \text{ m}^3/\text{t} = 100.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\begin{aligned} \text{Toplam oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} &= 100.000 \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \\ &= 919 \text{ t CO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

Mezbaha atıkları:

$$\text{Parçalanmış OKM miktarı} = 392 \text{ t/yıl} * 0,1681 * 0,8911 * 0,65 = 38 \text{ t/yıl}$$

$$\text{Maksimum potansiyel biyogaz üretimi} = 38 \text{ t/yıl} * 1.000 \text{ m}^3/\text{t} = 38.000 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

$$\begin{aligned} \text{Toplam oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} &= 38.000 \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3 \\ &= 349 \text{ tCO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

$$\text{Düzenli depolamada oluşan CO}_2 \text{ emisyonu} = 919 + 349$$

$$= \mathbf{1.268 \text{ tCO}_2/\text{yıl}} \text{ bulunmuştur.}$$

Buna göre; biyogaz tesisinin olmaması halinde öngörülen ikinci senaryoda hal ve market ile mezbaha atıklarının düzenli depolanması ile toplam 1.268 tCO₂/yıl seragazi oluşumu hesaplanmıştır.

Böylece biyogaz tesisinin olmaması halinde atıklardan çimen, tavuk gübresi ve büyükbaş hayvan gübresinin depolanıp araziye serilmesi; hal ve market ile mezbaha atıklarının da düzenli depolama alanında bertaraf edilmesi ile oluşan toplam CO₂ emisyonu miktarı;

Toplam oluşan CO₂ emisyonu = 2.967 + 1.268 = 4.235 tCO₂/yıl

olarak bulunmuştur. Hesaplanan değerler Çizelge 4.9'da yer almaktadır.

Çizelge 4.9. Senaryo 1 ve 2'ye göre hesaplanan CO₂ emisyonları

Atık Türü	Bertaraf Şekli	Oluşan CO ₂ emisyonu (tCO ₂ /yıl)
<i>Senaryo 1</i>		
Çimen	Araziye serme	2.105
Tavuk gübresi	Araziye serme	795
Büyükbaş hayvan gübresi	Araziye serme	67
Senaryo 1 Toplam	Araziye serme	2.967
<i>Senaryo 2</i>		
Hal-market	Düzenli depolama	919
Mezbaha	Düzenli depolama	349
Senaryo 2 Toplam	Düzenli depolama	1.268
Senaryo 1 ve 2 Toplam		4.235

Tesisin mevcut olmaması halinde tüm atık türlerinin bertarafı için oluşturulan senaryolara göre meydana gelen seragazi emisyonları Çizelge 4.10'da özetlenmiştir:

Çizelge 4.10. Tesisin mevcut olmaması halinde oluşan seragazı emisyonları

Atık Türü	Parçalanan OKM miktarı (t/yıl)	Maksimum Potansiyel Biyogaz Üretimi (m ³ /yıl)	Depolamada Oluşan Biyogaz (m ³ /yıl)	Araziye Sermede Oluşan Biyogaz (m ³ /yıl)	Düzenli Depolamada Oluşan Biyogaz (m ³ /yıl)	Toplamda Oluşan CO ₂ Emisyonu (tCO ₂ /yıl)
<i>Senaryo 1-Araziye serme</i>						
Çimen	818	818.000	163.600	65.440	-	2.105
Tavuk gübresi	309	309.000	61.800	24.720	-	795
Büyükbaş hayvan gübresi	26	26.000	5.200	2.080	-	67
Senaryo 1 Toplam	1.153	1.153.000	230.600	92.240	-	2.967
<i>Senaryo 2-Düzenli depolama</i>						
Hal ve market	100	100.000	-	-	100.000	919
Mezbaha	38	38.000	-	-	38.000	349
Senaryo 2 Toplam	138	138.000	-	-	138.000	1.268
Senaryo 1 ve 2 Toplam	1.291	1.291.000	230.600	92.240	138.000	4.235

- Biyogazın yakılmasından,
- Biyogaz üretimi sonucu oluşan fermente atığın depolanmasından ve araziye serilmesinden meydana geldiği kabul edilmiştir (Murphy et al., 2004).

Biyogaz tesisinde üretilen toplam biyogazın %6,3'ü kayıp ve kaçak miktarı olarak kabul edilmiştir (Murphy et al., 2004; Murphy and Power, 2009). Tesiste üretilen yıllık biyogaz miktarı 4.1.1'de hesaplandığı üzere 940.059 m³/gün olarak dikkate alınmıştır. Buna göre tesiste oluşan kayıp/kaçak biyogaz miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Kayıp/kaçak biyogaz miktarı (m}^3\text{/yıl)} = \text{Toplam üretilen biyogaz (m}^3\text{/yıl)} * \%6,3 \quad (4.37)$$

$$\text{Kayıp/kaçak biyogaz miktarı} = 940.059 \text{ m}^3\text{/yıl} * 0,063 = 59.224 \text{ m}^3\text{/yıl}$$

Kayıp/kaçak biyogaz, yakma işlemine tabii tutulmadan atmosfere yayılmış olur. Dolayısıyla kayıp/kaçak biyogaz miktarından kaynaklanan sera gazı miktarı;

$$\text{Kayıp/kaçak biyogaz sera gazı miktarı} = 59.224 \text{ m}^3\text{/yıl} * 9,19 \text{ kgCO}_2\text{/m}^3 = 544 \text{ tCO}_2\text{/yıl}$$

olarak bulunmuştur. Böylece tesiste kalan biyogaz miktarı;

$$\text{Tesiste kalan biyogaz miktarı} = 940.059 - 59.224 = 880.835 \text{ m}^3\text{/yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

Tesiste kalan biyogaz, yakma işlemine tabii tutulacağından oluşan sera gazı miktarı;

$$\text{Kalan biyogaz sera gazı miktarı} = 880.835 \text{ m}^3\text{/yıl} * 1,96 \text{ kgCO}_2\text{/m}^3 = 1.726 \text{ tCO}_2\text{/yıl}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Tesisin kullanılması halinde biyogaz üretiminin yanı sıra fermantasyon işlemi sonucu, toprak şartlandırıcısı ve gübre olarak kullanılacak fermente atık oluşur. Oluşan fermente katı atık miktarı Tübitak MAM'da proje yürütücüsü olan DoçDr.Durmuş Kaya'dan alınan bilgiye göre 14 t/gün'dür. Fermente gübrenin yoğunluğu 700-800 kg/m³ olarak literatürde yer almaktadır (RIS International et al., 2002; MacViro et al., 2006). Yapılan hesaplamalarda

yoğunluk 700 kg/m³ kabul edilmiştir. Buna göre fermantör çıkışında oluşan fermente atık miktarı;

$$\text{Fermente atık miktarı} = 14 \text{ t/gün} / 0,7 \text{ t/m}^3 = 20 \text{ m}^3/\text{gün}$$

olarak bulunmuştur. Tesisin yıllık çalışma süresi olan 8000 saat (333 gün) gözönüne alındığında yıllık oluşan fermente katı atık miktarı;

$$\text{Yıllık fermente katı atık miktarı} = 20 \text{ m}^3/\text{gün} * 333 \text{ gün/yıl} = 6.660 \text{ m}^3/\text{yıl}$$

hesaplanmıştır.

Fermente katı atığın depolanması ve araziye serilmesi sonucu oluşan CO₂ atmosfere yayılacaktır. Dolayısıyla fermente katı atığın depolanması ve araziye serilmesi sonucu oluşan sera gazı miktarı;

$$\text{Fermente katı atık sera gazı miktarı} = 6.660 \text{ m}^3/\text{yıl} * 9,19 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3 = 61 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

şeklinde bulunmuştur.

Böylece atıkların biyogaz tesisinde değerlendirilmesi sonucu oluşan toplam sera gazı üretimi;

$$\text{Toplam sera gazı üretimi} = 544 + 1.726 + 61 = 2.331 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan değerler Çizelge 4.11'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.11. Tesisin mevcut olması halinde hesaplanan sera gazı emisyonları

Sera Gazı Emisyonu Üretimi	Oluşan Sera Gazı Emisyonu (tCO ₂ /yıl)
Biyogaz üretimi ve depolanması sırasında oluşan kayıp/kaçak	544
Biyogazın yakılması	1.726
Fermente gübrenin depolanması ve araziye serilmesi	61
Toplam	2.331

Atıkların biyogaz tesisinde değerlendirilmesi durumu ile biyogaz tesisinin olmaması halinde oluşan sera gazı miktarları gözönüne alınarak net sera gazı üretimi hesaplanmıştır. Buna göre net sera gazı üretimi;

$$\text{Net sera gazı üretimi} = 4.235 - 2.331 = 1.904 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

Böylece biyogaz tesisinin olmaması halinde, atıkların depolanması ve araziye serilmesi ile düzenli depolanması durumunda 1.904 tCO₂/yıl fazladan sera gazı üretimi sözkonusu olacaktır.

4.3.2. Sera gazındaki azalma hesabı

Sera gazı emisyonlarındaki azalma hesabında biyogaz tesisinin olmaması halinde, elektrik ve ısının fosil yakıtlardan temin edilmesi sonucu oluşan sera gazı emisyonları hesaplanmıştır. Böylece biyogaz tesisinin kullanılması halinde BIG sistemi ile sağlanacak sera gazı emisyon miktarındaki azalma bulunmuştur.

Yapılan hesaplamalarda elektrik enerjisi üretiminin fosil kaynaklı yakıtlarla yapılması halinde oluşan CO₂ emisyonu üretimi hesabı için, literatürde yer alan bilgiler ile Türkiye’de elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil kaynaklar ve bunların neden oldukları emisyon miktarları kullanılmıştır (Arı, 2010), (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. 2008 yılı Türkiye elektrik üretiminde kullanılan fosil kaynaklı yakıtlar ve oluşan emisyon miktarları (Arı, 2010)

Fosil Yakıt Türü	Kullanım Miktarı	Oluşan CO ₂ emisyonu (kgCO ₂ /MWsa)
Doğal gaz	%49,23	374
Linyit	%21,10	1.080
Taşkömürü	%7,19	1.018
Fuel-oil	%4,59	755

Tesisten elde edilecek 350 kW elektrik enerjisinin %80’inin satılacağı daha önceki bölümde kabul edilmişti. Bu kabule göre satılan elektrik enerjisi miktarı;

$$\text{Satılan elektrik enerjisi miktarı} = 350 * 0,8 = 280 \text{ kW}$$

olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.12'de yer alan bilgilere göre; satılacak elektrik enerjisinin doğalgaz, linyit, taşkömürü ve fuel-oil fosil yakıtlarından elde edilmesi halinde oluşacak CO₂ emisyonları, aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Doğalgazdan kaynaklanan CO₂ emisyonu

$$= 280 \text{ kW} * 0,4923 * 374 \text{ kgCO}_2/\text{MWsa} * 10^{-6} * 8.000 \text{ sa/yıl} = 412,43 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

Linyitten kaynaklanan CO₂ emisyonu

$$= 280 \text{ kW} * 0,2110 * 1080 \text{ kgCO}_2/\text{MWsa} * 10^{-6} * 8.000 \text{ sa/yıl} = 510,45 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

Taşkömüründen kaynaklanan CO₂ emisyonu

$$= 280 \text{ kW} * 0,0719 * 1018 \text{ kgCO}_2/\text{MWsa} * 10^{-6} * 8.000 \text{ sa/yıl} = 163,96 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

Fuel-oilden kaynaklanan CO₂ emisyonu

$$= 280 \text{ kW} * 0,0459 * 755 \text{ kgCO}_2/\text{MWsa} * 10^{-6} * 8.000 \text{ sa/yıl} = 75,63 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

bulunmuştur. Buna göre elektrik enerjisi eldesinde fosil yakıtların kullanılması halinde oluşacak toplam CO₂ emisyonu miktarı;

$$\text{Toplam CO}_2 \text{ emisyonu} = 412,43 + 510,45 + 163,96 + 75,63 = 1.162,47 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

hesaplanmıştır. Böylece biyogaz tesisinin olmaması halinde elektrik enerjisinin fosil yakıtlardan elde edilmesi ile oluşacak emisyon miktarı yaklaşık 1.163 tCO₂/yıl olarak bulunmuştur.

Literatürde yer alan bilgilere göre ise elektrik enerjisi üretiminde fosil kaynakların kullanılması halinde oluşan CO₂ miktarı 734 gCO₂/kWsa olarak kabul edilmiştir (Murphy and McKeogh, 2004). Buna göre 280 kW elektrik enerjisi üretiminde biyogaz yerine fosil yakıt kullanılması halinde oluşan CO₂ miktarı;

Elektrik enerjisi fosil yakıt CO₂ emisyonu miktarı

$$= 280 \text{ kW} * 8000 \text{ sa} * 734 \text{ gCO}_2/\text{kW} * 10^{-6} = 1.644 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

olarak hesaplanmıştır.

Isı enerjisi üretiminde ise ısı enerjisi üretiminin doğal gaz ile yapılması halinde oluşan CO₂ emisyonu 240 gCO₂/kWsa olarak kabul edilmiştir (Murphy and McKeogh, 2004).

Tesisten elde edilecek 450 kW ısı enerjisinin %70'inin satılacağı daha önceki bölümde öngörülmüştü. Satılan ısı enerjisi miktarı;

$$\text{Satılan ısı enerjisi miktarı} = 450 * 0,7 = 315 \text{ kW}$$

olarak bulunmuştur.

315 kW ısı enerjisi eldesinde biyogaz yerine doğalgaz kullanılması halinde oluşan CO₂ miktarı;

$$\begin{aligned} \text{Isı enerjisi doğalgaz CO}_2 \text{ emisyonu miktarı} &= 315 \text{ kW} * 8000\text{sa} * 240 \text{ gCO}_2/\text{kW} * 10^{-6} \\ &= 605 \text{ tCO}_2/\text{yıl} \end{aligned}$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda elektrik enerjisi eldesinde fosil yakıtların kullanımı ile ilgili Türkiye için belirlenen değerlere göre bulunan CO₂ emisyon miktarı kullanılmıştır.

Böylece biyogaz tesisinin olmaması halinde fosil yakıtlardan elektrik ve ısı enerjisi üretilmesi durumunda oluşan toplam CO₂ emisyonu miktarı;

$$\text{Fosil yakıtlardan oluşan sera gazı miktarı} = 1.163 + 605 = 1.768 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

olarak bulunur. Bu miktar, aynı zamanda birleşik ısı ve güç sisteminden elde edilebilecek seragazı emisyon azalımını verir.

Biyogaz tesisinden elde edilecek toplam sera gazı azalma miktarı; net sera gazı üretimi ile, fosil yakıtlardan elektrik ve ısı enerjisi üretimi durumunda oluşan sera gazı miktarlarının toplamına eşittir. Bu durumda tesisten sağlanan toplam sera gazı azalma miktarı;

$$\text{Toplam sera gazı azalma miktarı} = 1.904 + 1.768 = 3.672 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

bulunmuştur.

Tesisin sera gazı analizi sonucu hesaplanan değerleri izelge 4.13'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.13. Tesisin sera gazı analizi zeti

Sera Gazı retim Aşamaları	Sera Gazı Miktarı (tCO ₂ /yıl)
Biyogaz tesisi olmaması halinde oluşan sera gazı miktarı	4.235
Biyogaz tesisi sera gazı miktarı	2.331
Net sera gazı retimi	1.904
Fosil yakıt ile elektrik enerjisi eldesinde oluşan sera gazı miktarı	1.163
Fosil yakıt ile ısı enerjisi eldesinde oluşan sera gazı miktarı	605
Fosil yakıtlardan oluşan toplam sera gazı miktarı	1.768
Biyogaz tesisi ile sera gazında toplam azalma miktarı	3.672

Biyogaz tesisinin kullanılması halinde toplam sera gazında 3.672 tCO₂/yıl oranında azalma gerçekleşecektir.

Fosil yakıtlardan elektrik enerjisi elde edilmesinde Türkiye verileri yerine literatürde yer alan kabullerin kullanılması halinde (Murphy and McKeogh, 2004), sera gazında toplam 4.153 tCO₂/yıl azalma hesaplanmıştır.

Çalışma kapsamında yapılan teknik, ekonomik ve çevresel analizlerde hesaplanan kritik unsurlar izelge 4.14'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.14. Biyogaz üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel analiz zeti

Hesaplanan Unsurlar	Miktarı
Organik atıklardan elde edilen toplam biyogaz miktarı (m ³ /gün)	2.823
Biyogaz tesisi net enerji verimi (%)	85
Biyogaz tesisi bağlı birincil enerji tasarrufu (%)	22
Biyogaz tesisinden elde edilen yıllık gelir (/yıl)	425.460
Biyogaz tesisi yıllık gider (/yıl)	221.000
Biyogaz tesisi yıllık net gelir (/yıl)	204.460
Biyogaz tesisi geri ödeme süresi (yıl)	8,31
Biyogaz tesisi net bugünkü değeri ()	55.546
Biyogaz tesisi iç karlılık oranı (%)	10,47
Biyogaz tesisi ile sera gazında toplam azalma miktarı (tCO ₂ /yıl)	3.672

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de nüfus artışına ve teknolojik gelişmelere paralel olarak enerji ihtiyacının giderek artması, fosil kaynaklı yakıtların giderek azalması ve artan çevresel sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi arttırmaktadır.

Ülkemiz için tarım ve hayvancılık faaliyetleri önemli geçim kaynakları arasında olduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarından biyogaz, yüksek üretim potansiyeli olan önemli bir enerji kaynağıdır. Biyogaz, atıkların anaerobik fermantasyon sonucu organik kısımlarının bozunması ile oluşan metan ve karbondioksit ağırlıklı bir gaz karışımıdır. Anaerobik fermantasyonda düzenli/vahşi depolanan ve/veya depolanıp araziye serilen tarımsal atıklar, hayvansal atıklar ve hayvan gübreleri, endüstriyel atıklar, sebze, meyve ve gıda atıkları, belediye organik atıkları ve atıksu arıtma tesisi atıkları, artık birer hammadde olarak değerlendirilmektedir.

Tez kapsamında organik atıkların değerlendirilmesi amacıyla kurulmakta olan bir biyogaz tesisi teknik, ekonomik ve çevresel açıdan incelenmiştir. Tesise kabul edilen çimen, hal-market, mezbaha, büyükbaş hayvan gübresi ve tavuk gübresi atıklarından 2.823 m³/gün’lük biyogaz eldesi hesaplanmıştır. Tesiste birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) sisteminin kullanılması ile geleneksel uygulamada depolanıp araziye serilen veya vahşi/düzenli depolamaya gönderilen atıklardan 350 kW elektrik ve 450 kW ısı enerjisi olmak üzere enerji elde edilmesi beklenmektedir. Kojenerasyon sistemi sayesinde, elektrik ve ısıyı ayrı ayrı üreten sistemlere göre 264 kW birincil enerji tasarrufu sağlanacağı bulunmuştur. Bu da %22’lik bağlı birincil enerji tasarrufu anlamındadır.

Tesiste üretilen fazla miktardaki elektrik ve ısı satılarak gelir elde edilebilir. Yapılan hesaplamalara göre 280 kW’lık fazla elektrik enerjisinin satışından 156.800€ ve 315 kW’lık fazla ısı enerjisinin satışından 75.600€ gelir elde edilebileceği belirlenmiştir. Bir evde tüketilen elektrik enerjisi 2.628 kW/yıl ve ısı enerjisi 66 GJ/yıl kabul edilirse (Murphy et al. 2004) satılan elektrik ve ısı enerjilerinin kullanılabileceği ev sayıları;

Elektrik enerjisi kullanan ev sayısı = $(280 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ sa/yıl}) / 2628 \text{ kW} \cdot \text{sa/yıl} = 852 \text{ ev}$

Isı enerjisi kullanan ev sayısı = $(315 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ sa/yıl}) / (66 \cdot 10^3 \text{ GJ/yıl} / 3,6 \text{ GJ/kW})$
= 138 ev

olarak hesaplanabilir. Buna göre tesiste elde edilen biyogazın BIG sisteminde kullanılması ile 280 kW fazla elektrik ve 315 kW fazla ısı enerjisi üretilir. Bu enerjiler ile 852 evin elektrik ve 138 evin de ısı enerjisi ihtiyacı karşılanabilir ve toplamda 232.400 €/yıl gelir elde edilebilir.

Tesisten elde edilen enerjinin yanısıra tesis çıkışında gübre olarak kullanılacak katı ve sıvı formda fermente atık oluşur. Katı formdaki fermente atığın satışı ile 139.860 €/yıl gelir elde edilebileceği hesaplanmıştır. Böylece biyogaz tesisi teknik açıdan incelendiğinde, üretilen enerjinin ve oluşan atıkların kullanımı ve satışından gelir eldesi de mümkün olmaktadır. Bu sayede atıklar değerlendirilerek, teknik ve ekonomik açıdan fayda sağlanmıştır.

Tesisin ekonomik olarak irdelenmesinde öncelikle statik yaklaşımlardan geri ödeme süresi yöntemi kullanılmış ve tesis geri ödeme süresi 8,31 yıl olarak hesaplanmıştır. Tesisin ekonomik analizi kapsamında dinamik değerlendirilmesinde net bugünkü değer analizi ve iç karlılık oranı analizi kullanılmıştır. Buna göre 20 yıllık proje ömrü süresince tesis gelir ve giderleri hesaplanmıştır. Tesisten elde edilecek gelirin şimdiki değeri, 20 yıllık proje ömrü sonunda tesisin 100.000€ hurda bedeli de dahil olmak üzere 3.637.045€'dur. Tesis toplam giderinin şimdiki değeri ise, tesis ilk yatırım maliyeti de dahil olmak üzere 3.581.499€'dur. Böylece tesisin net şimdiki değeri 55.546€ olarak bulunmuştur. Paranın bugünkü değerini dikkate alan diğer bir yöntem olan iç karlılık oranı analizinde ise, iç karlılık oranı, tesis için seçilen iskonto oranından büyük olarak bulunmuştur. Böylece tesisin net şimdiki değeri pozitif ve iç karlılık oranı da tesis için seçilen iskonto oranından büyük olarak hesaplandığından, tesisin ekonomik açıdan yapımının uygunluğuna karar verilmiştir.

Artan nüfus ve enerji ihtiyacına bağlı olarak, tüketilen fosil kaynaklı yakıtlarda da artış gözlenmektedir. Bu durum, sera gazı emisyonlarının dolayısıyla çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın da artmasına neden olmaktadır. Bir projenin hayata geçirilmesinde teknik ve ekonomik faydanın yanı sıra çevresel açıdan sağlayacağı

faydaların olup olmadığı da irdelenmelidir. Bu amaçla tesisin faaliyete geçmesi ile sağlanacak sera gazı emisyonlarındaki azalma hesaplanmıştır. Yapılan hesaplara göre, biyogaz tesisinin olmaması halinde 4.235 tCO₂/yıl, biyogaz tesisinin olması halinde ise 2.331 tCO₂/yıl seragazı emisyonu oluşur. Buna göre net sera gazı üretimi 1.904 tCO₂/yıl olarak hesaplanmıştır. Sera gazı azaltım hesaplarında ise biyogaz ve BIG sistemi kullanımı, fosil yakıtlardan elde edilecek aynı miktardaki ısı ve elektrik enerjisinden kaynaklanan CO₂ emisyonu ile karşılaştırılmıştır. Buna göre elektrik enerjisi üretiminin fosil yakıtlardan sağlanması halinde 1.163 tCO₂/yıl, ısı enerjisi üretiminin doğalgazdan sağlanması halinde 605 tCO₂/yıl sera gazı oluştuğu bulunmuştur. Böylece atıkların biyogaz tesisinde kullanılması halinde seragazında oluşan toplam azalma 3.672 tCO₂/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sayede biyogaz tesisi ile çevresel olarak fayda sağlanmış ve atıkların geleneksel bertarafı sırasında oluşan sera gazı emisyonlarında önemli miktarda azalma olmuştur.

Böylece yapılan çalışma ile biyogaz tesislerinin teknik, ekonomik ve çevresel analizi yapılarak, biyogaz üretiminden elde edilebilecek faydalar belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilen 3 ana başlık altında toplanabilir:

1. Biyogaz tesisinde organik atıkların kullanımı ile anaerobik fermantasyon yoluyla enerji elde etmek mümkündür.
2. Tesisin ekonomik ömrü süresince, hesaplanan gelir ve giderlere ve yapılan ekonomik analizlere göre, biyogaz üretimi ile kar elde etmek mümkündür.
3. Biyogaz üretimi ile en önemli çevresel sorunlardan küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarında azalma sağlamak mümkündür.

5.2. Öneriler

Biyogaz tesislerinde, insani faaliyetler sonucu oluşan ve bertaraf edilmeleri maliyet ve alan ihtiyacı doğuran atıklardan enerji elde edilebilmektedir. Atıkların kullanımı ile enerji eldesinin yanı sıra, yine farklı amaçlarla kullanılacak ve gelir elde edilebilecek ikincil atıklar da oluşmaktadır. Bu nedenle biyogaz tesislerinin yaygınlaşmasında fayda görülmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışma ile, farklı atıkların birlikte fermantasyonu anlamına gelen kofermantasyon ile, daha yüksek verimlerin elde edildiği bulunmuştur. Bu nedenle anaerobik fermantasyonda komateryal kullanımı yaygınlaştırılmalıdır.

Yapılan çalışmada, birleşik ısı ve güç sisteminin kullanılması ile ısı ve elektriğin birlikte üretilmesi ile 264 kW'lık birincil enerji tasarrufu ve %22'lik bağıl birincil enerji tasarrufu sağlanmıştır. Bu nedenle biyogaz tesislerinde BIG sistemleri, daha verimli enerji eldesinde değerlendirilebilir.

Tezin ekonomik analiz bölümünde net bugünkü değer analizi pozitif olarak hesaplandığından ve iç karlılık oranı analizinde İKO, iskonto oranından büyük bulunduğundan biyogaz tesisleri ile enerji eldesinde kar elde edilebildiği de dikkate alınmalıdır.

Çalışmada yapılan sera gazı analizinde ise, biyogaz tesislerinin kullanımı ile CO₂ emisyonlarında önemli ölçüde azalma olduğu hesaplanmıştır. Biyogaz tesisleri bu yönleri ile, çevreye duyarlı ve fayda sağlayan sistemler olarak da değerlendirilebilir.

Çalışma kapsamında değerlendirilen pilot tesis henüz işletmeye alınmadığından ve Türkiye'de benzer kapasite ve özellikte başka bir tesis mevcut olmadığından, yapılan hesaplamalarda literatür bilgileri kullanılmıştır. Bu nedenle bulunan değerler oluşması muhtemel, yaklaşık değerlerdir. Tez kapsamında incelenen pilot proje işletmeye alındığında, bulunan gerçek değerler ile bu çalışmada hesaplanan değerler karşılaştırılmalıdır. Böylece hem daha gerçekçi sonuçlara ulaşmak mümkün olacak hem de yerel koşulların tesisin tasarım ve işletmesine olan etkisi belirlenmiş olacaktır. Yapılan mukayeseye göre benzer tesislerin yaygınlaştırılmasında ve gelecekte yapılacak çalışmalarda bu çalışma örnek olarak kullanılabilir.

Gelişen teknoloji, artan çevresel sorunlar ve CO₂ emisyonları, uyulması gereken çevresel yönetmelik ve AB direktifleri ile Kyoto Protokolü gereklilikleri gözönüne alındığında, teknik açıdan uygun, ekonomik açıdan kar elde edilebilen, çevresel açıdan seragazi emisyonları azalmasını sağlayan ve her yerleşim bölgesinde kolaylıkla kullanılabilme özelliği ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından ayrılan

biyogaz üretiminin, bölge ve atık koşullarına uygun tasarımlarla sürdürülebilir enerji eldesinde kullanımı arttırılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ak, N., Organik katı atıkların biyometanizasyonu ile enerji ve organik gübre elde edilmesini incelemek, 2008, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES, s. 1-12.
- Akbulut, A., Dikici, A., Elazığ ilinin biyogaz potansiyeli ve maliyet analizi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 2004, s. 36-41.
- Akpınar, A., Kömürcü, M.İ., Kankal, M., Özölçer, İ.H., Kaygusuz, K., Energy situation and renewables in Turkey and environmental effect of energy use, 2008, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, p. 2013-2039.
- Aoki, K., Umetsu, K., Nishizaki, K., Takahashi, J., Kishimoto, T., Tani, M., Hamamoto, O., Misaki, T., Thermophilic biogas plant for dairy manure treatment as combined power and heat system in cold regions, 2006, International Congress Series 1293, 238-241.
- Arı, İ., Investigating the CO₂ emission of Turkish electricity sector and its mitigation potential, 2010, METU Environmental Engineering, MS Thesis.
- ASAT, Antalya Su ve Atıksu İdaresi Genel Müdürlüğü, Çamur kurutma, Arıtma çamuru termal kurutma ve kojenerasyon tesisi, 2010, www.asat.gov.tr.
- Axaopoulos, P., Panagakis, P., Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings, 2003, Biomass and Bioenergy 24, p. 239-248
- Berglund, M., Börjesson, P., Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, 2006, Biomass and Bioenergy 30, p. 254-266.
- Biswas, W.K., Lucas, N.J.D., Economic viability of biogas technology in a Bangladesh Village, 1997, Energy 22, No:8, pp. 763-770.
- Boardman, A.E., Greenberg, D.H., Vining, A.R., Weimer, D.L., Cost-benefit analysis, concepts and practice, 2006, Pearson International Edition, Third Edition, p. 131-141.
- Bouallagui, H., Lahdheb H., Romdan, E.B., Rachdi, B., Hamdi, M., Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, 2009, Journal of Environmental management 90, p. 1844-1849.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R.B., Hamdi, M., Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, 2005, Process biochemistry 40, p.989-995.
- Bouallagui, H., Torrijos, M., Godon, J.J., Moletta, R., Cheikh, R.B., Touhami, Y., Delgenes, J.P., Hamdi, M., Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance, 2004, biochemical engineering journal 21, p. 193-197.

- Boukis, I., Vassilakos, N., Karellas, S., Kakaras, E., Techno-economic analysis of the energy exploitation of biomass residues in Heraklion Prefecture-Crete, 2009, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, p. 362-377.
- Börjesson, P., Berglund, M., Environmental systems analysis of biogas systems- Part II: the environmental impact of replacing various reference systems, 2007, *Biomass and Bioenergy* 31, p. 326-344.
- Börjesson, P., Berglund, M., Environmental systems analysis of biogas systems- Part I: fuel-cycle emissions, 2006, *Biomass and Bioenergy* 30, p. 469-485.
- Bursa Çevre Merkezi, Çevre yatırımlarının teknik ve ekonomik fizibilite analizi, 2003, *Aylık Bülten*, s. 2-3.
- Cengel, Y.A., Boles, M.A., Exergy: a measure of work potential, 2005, *Thermodynamics: An engineering approach*, 5th edition, p. 423-485.
- Chynoweth, D.P., Owens, J.M., Legrand, R., Renewable methane from anaerobic digestion of biomass, 2001, *Renewable Energy* 22, p. 1-8.
- Clear-Green environmental Inc., Biogas digester project, emission reduction/removal report, 2002, p. 1-5.
- Comino, E., Rosso, M., Riggio, V., Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix, 2009, *Bioresource Technology* 100, p. 5072-5078.
- Commission of the European Communities, Communication from the commission to the council and the European Parliament, Renewable Energy Road Map, renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future, 2007, Brussel, COM (2006) 848 final, p.1-20.
- Deublein, D., Steinhauser, A., Biogas from Waste and Renewable Resources, 2008, p.1-450.
- Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC, 2004, *Official Journal of the European Union*, p. 1-11.
- Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repaling Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 2009, *Official Journal of the European Union*, p. 1-47.
- Dong, L., Liu, H., Riffat, S., Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems-a literature review, 2009, *Applied Thermal Engineering* 29, 2119-2126.
- Engler, C.R., Jordan, E.R, McFarland, M.J., Lacewell R.D., Economics and environmental impact of biogas production as a manure management strategy, p. 109-114.

- Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A., Thyselius, L., ORWARE- a simulation tool for waste management, 2002, Resources, Conservation and Recycling 36, 287-307.
- Ertesvag, I.S., Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power (CHP), 2007, Energy 32, 2038-2050.
- EurObser'ER, Biogas Barometer, 2008, p.45-59.
- Eyidoğan, M., Biyogazın saflaştırılması ve motorlu taşıt yakıtı olarak kullanımı, 2008, Mühendis ve Makina Cilt: 49 Sayı:584, s. 18-24.
- Gedik, T., Akyüz, K.C., Akyüz, İ., Yatırım projelerinin hazırlanması ve değerlendirilmesi (iç karlılık oranı ve net bugünkü değer yöntemlerinin incelenmesi), 2005, ZKÜ Bartın Orman Fakültesi Dergisi Cilt:7 Sayı:7, s. 51-61.
- Gerardi, M.H, The Microbiology of Anaerobic Digesters, 2003, Wastewater Microbiology Series, Wiley-Interscience, p. 1-188.
- Gültekin, H., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2000-2009 yılları arasında işletmeye açılan üretim santrallerinin, verimlilik, teknoloji ve sektörlerine yönelik değerlendirme ve piyasa eğilimleri, 2009, ICCI 15.Uluslararası enerji ve çevre fuarı ve konferansı.
- Holm-Nielsen J.B., Seadi, T.A., Oleskowicz-Popiel, P., The Future of anaerobic digestion and biogas utilization, 2009, Bioresource Technology 100, 5478-5484.
- IEA, Renewables and Waste in Turkey in 2006, p.1.
- Igoni, A.H., Ayotamuno, M.J., Eze, C.L., Ogaji, S.O.T., Probert, S.D., Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste, 2008, Applied Energy 85, 430-438.
- İGDAŞ, Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, 2007, s. 1-4.
- Jingura, R.M., Matengaifa, R., Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe, 2009, Renewable and sustainable energy reviews 13: 1116-1120.
- Kaya, D., Yıldız, O., Saraç, H.İ., Ekinci, K., Koçar, G., Akgün, F., Tırıs, M., Tübitak pilot biyogaz santralı proses tekniği, 2009, s. 1-9.
- Kılış, B.İ., Birlikte üretim sistemlerinin (kojenerasyon) analizi ve çevresel yararları, 2007, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği, Isıtma, Soğutma, Havalandırma, Klima, Yangın ve Sıhhi Tesisat Dergisi, Temel Bilgiler, Tasarım ve Uygulama Eki, sayı: 26, s. 1-15.

- Kaygusuz, K., Keleş, S., Use of Biomass as a transitional strategy to a sustainable and clean energy system, 2009, Energy sources, Part A: recovery, utilization and environmental effects 31, 86-97.
- Lou, X.F., Nair, J., The Impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions- A review, 2009, Bioresource Technology 100, p. 3792-3798.
- Macias-Coral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H., Longworth, J., Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure, 2008, Biosource Technology 99, 8288-8293.
- MacViro, Jacques Whitford, Durham/York Residual Waste Study, 2006, Annex:E-2: Supporting Technical Document on Facility Land Requirements, Report on Selection of Preferred Residuals Processing System, 1-11.
- Morin, P., Marcos, B., Moresoli, C., Laflamme, C.B., Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada, 2009, Applied Energy, p. 1-9.
- Mueller, S., Manure's allure: variation of the financial, environmental and economic benefits from combined heat and power systems integrated with anaerobic digesters at hog farms across geographic and economic regions, 2007, Renewable Energy 32, 248-256.
- Murphy, J.D., Power, N., Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilising three different crop rotations, 2009, Applied Energy 86, p. 25-36.
- Murphy, J.D., McKeogh, E., The benefits of integrated treatment of wastes for the production of energy, 2006, Energy 31, 294-310.
- Murphy, J.D., McKeogh, E., Erratum to "The benefits of integrated treatment of wastes for the production of energy", 2006, Energy 31, 547-549.
- Murphy, J.D., McKeogh, E., Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste, 2004, Renewable Energy 29, 1043-1057.
- Murphy, J.D., McKeogh, E., Kiely, G., Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation, 2004, Applied Energy 77, 407-427.
- Mwirigi, J.W., Makenzi, P.M., Ochola, W.O., Socio-economic constraints to adoption and sustainability of biogas technology by farmers in Nakuru Districts, Kenya, 2009, Energy for Sustainable Development 13, p. 106-115.
- Nesheim, S.J., Ertesvag, I.S., Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power, 2007, Energy Conversion and Management 48, 1004-1015.

- Osorio, F., Torres, J.C., Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production, 2009, Renewable Energy, p. 1-8
- Önenç, Ö., Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Şube Müdürlüğü, Yenilenebilir enerji kaynaklarında yapılan çalışmalar ve mevzuat, 2009, Yapı Fuarı, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükkent Şubesi Ekolojik Yapı Tasarımı, Malzeme, Teknoloji ve Çevre Paneli, p. 1-48.
- Öner, B., Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Avrupa Birliği Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, Avrupa Birliği enerji politikasındaki gelişmeler: arz güvenliğinin sağlanması, 2009, ICCI 15.Uluslararası enerji ve çevre fuarı ve konferansı bildiriler kitabı, s. 37-43.
- Özdemir, M., Parmaksızoğlu, İ.C., Mekanik tesissatta ekonomik analiz, 2003, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, s. 1-9.
- Öztürk, M., Karali, İ., Çöp depolama alanlarında biyogaz üretimi, 2009, s. 1-44.
- Öztürk, M., Hayvan gübresinden biyogaz üretimi, Çevre ve Orman Bakanlığı, 2005, p. 9-21.
- RIS International, MacViro and Aka, 2002, City of Toronto, Generating Biogas from Source Separated Organic Waste for Energy Production, Final Report, 1-229.
- Sasse, L., Biogas Plants, 1988, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien- GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, p. 1-66.
- Seadi, T.A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., Biogas Handbook, Biogas for Eastern Europe, 2008, p.1-126.
- Sevilgen, S.H., Erdem, H.H., Çetin, B., Akkaya, A.V., Dağdaş, A., Effect of economic parameters on power generation expansion planning, 2005, Energy Conversion and Management 46, p. 1780-1789.
- Sosnowski, P., Wiczorek, A., Ledakowicz, S., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, 2003, Advances in Environmental Research 7, p. 609-616.
- Sözer, S., Yıldız, O., Sığır gübresi ve peynir altı suyu karışımlarından biyogaz üretimi üzerine bir araştırma, 2006, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 19 (2), s. 179-183.
- Taleghani, G., Kia, A.S., Technical-economical analysis of the Saveh biogas power plant, 2005, Renewable Energy 30, 441-446.
- Themelis, N.J., Ulloa P.A., Methane generation in landfills, 2007, Renewable Energy 32, 1243-1257.

- Tricase, C., Lombardi, M., State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations, 2009, Renewable Energy 34, 477-485.
- Tsagarakis, K.P., Papadogiannis, C., Technical and economic evaluation of the biogas utilization for energy production at Iraklio Municipality, Greece, 2006, Energy Conversion and Management 47, p. 844-857.
- Tübitak MAM Teknik Rapor-5, Pilot Ölçekli Biyogaz Üretim Sistemi Tasarımı, İmalatı ve Testleri, 2008, p. 1-22.
- TÜİK, Seragazi emisyon envanteri, 2007, Haber Bülteni 111, p.1-2.
- TÜİK, Hayvansal üretim, 2008, Haber Bülteni 83, p.1-2.
- TÜİK, Bitkisel üretim II. tahmini, 2009, Haber Bülteni 206, p.1-2.
- TÜİK, Belediye katı atık istatistikleri, 2006, Haber Bülteni 75, p.1-2.
- TÜİK, Elektrik tüketim ve dağıtımı IV. dönem, 2006, Haber Bülteni 44, p.1.
- Türker, M., Anaerobik biyoteknoloji ve biyogaz üretimi, dünyada ve Türkiye’de eğilimler, 2008, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, s. 305-312.
- Ünal, E., Gözen, M., Elektrik piyasasında yeşil sertifika uygulamasının düzenleme kurumları açısından incelenmesi, 2007, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, TMMOB Türkiye VI. Enerji Sempozyumu-Küresel Enerji Politikaları ve Türkiye Gerçeği, 1-21.
- Vandevivere, P., De Baere, L., Verstraete, W., Types of anaerobic digesters for solid wastes, 2003, IWA publishing, biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, p. 111-137.
- Werner, U., Stohr, U., Hees, N., Biogas Plants in Animal Husbandry, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 1989, p. 1- 55.
- Wulf, S., Jaeger, P., Döhler, H., Balancing of greenhouse gas emissions and economic efficiency for biogas-production through anaerobic co-fermentation of slurry with organic waste, 2006, Agriculture, Ecosystems and Environment 112, p. 178-185.
- Yaldız, O., Tarımsal atık yönetimi, enerji (biyogaz) ve organik gübre (kompost) üretimi, 2008, Akdeniz Üniversitesi Temiz Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, T.C. Tarım ve Köyşleri Bakanlığı, Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayın No:131, TAYEK Tarımsal Araştırma Yayın ve Eğitim Koordinasyonu, 2008 Yılı Hayvancılık Grubu Bilgi Alışveriş Toplantısı Bildirileri, Menemen İzmir, s. 116-137.
- Yaldız, O., Biyogaz üretiminde kofermantasyon çalışmaları, 2001, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Yayın No E/2001/275, Kayseri, s. 229-238.

Yu, H.W., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion, 2002, Waste Management 22, p.1-5.

Zupancic, G.D., Uranjek-Zevart, N., Ros, M., Full scale anaerobic co-digestion of organic waste and municipal sludge, 2008, Biomass and Bioenergy 32, 162-167.

www.agroenergien.com/index.php/bds-biomass-drying-system

www.eie.gov.tr

www.enerji.gov.tr

www.igdas.com.tr/Docs/Pdf/KojenerasyonVeTrijenerasyonSistemleri.pdf

www.kocaeli.bel.tr

www.toronto.ca/teo/pdf/anaerobic_appendices.pdf

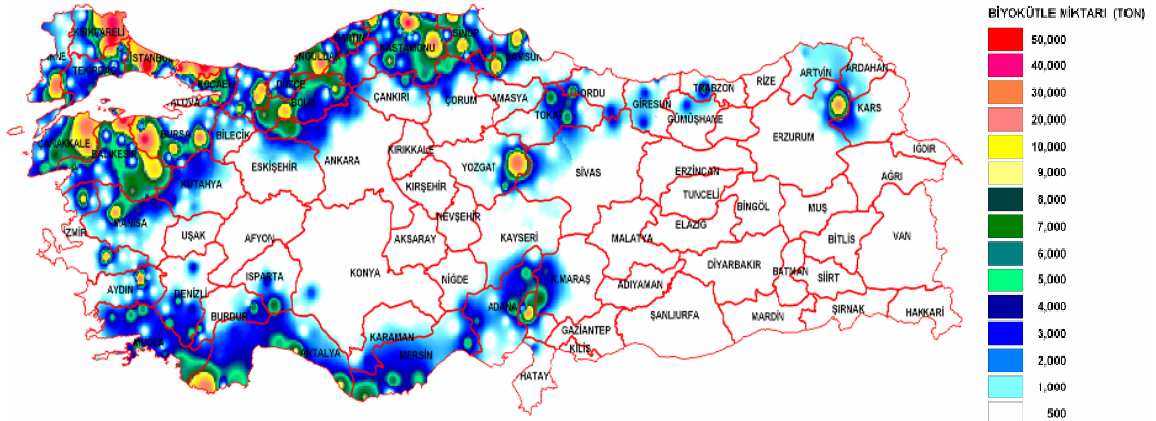
www.wikipedia.org

EKLER DİZİNİ

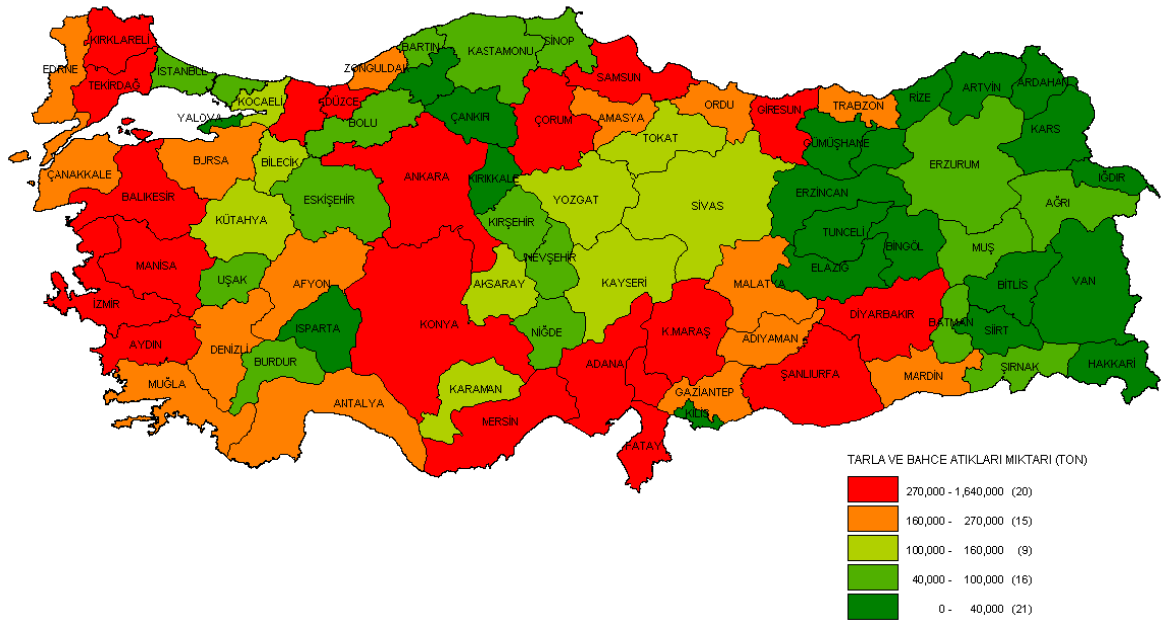
Ek 1: Türkiye Biyogaz Üretimine Esas Atık Envanter Haritaları

Ek 2: Kocaeli İli Biyogaz Tesisinde Kullanılabilecek Atık Envanteri

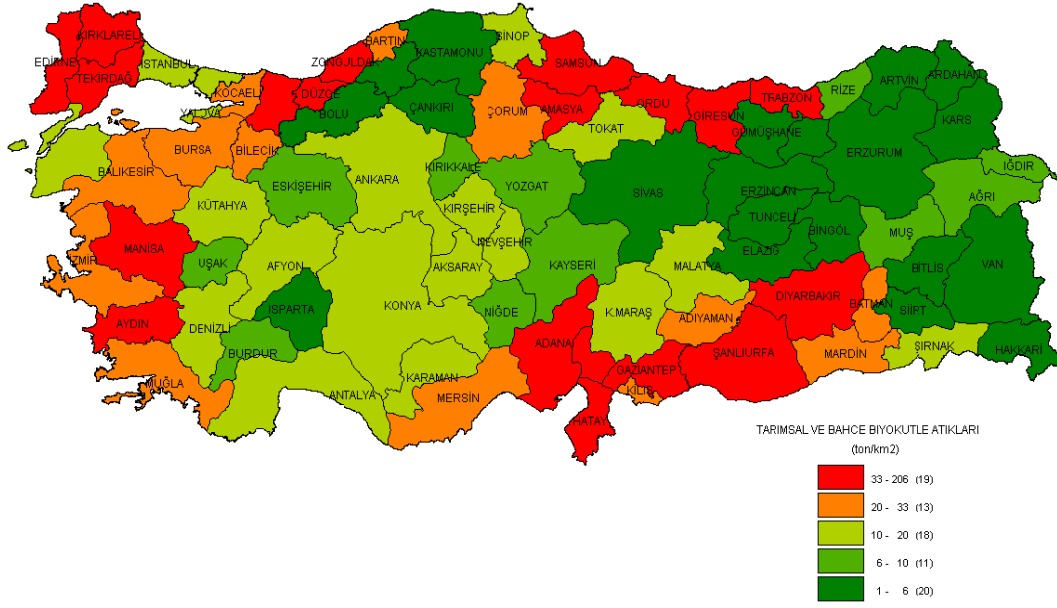
Ek 1. Türkiye Biyogaz Üretimine Esas Atık Envanter Haritaları



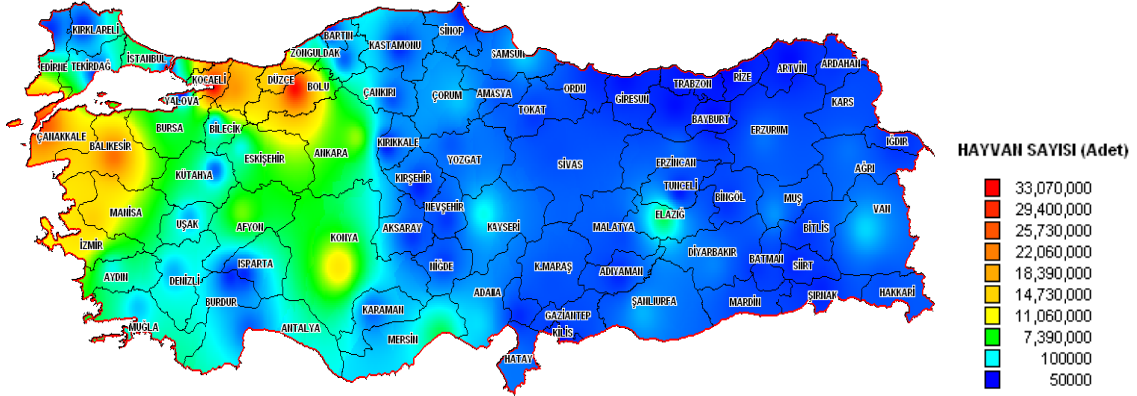
Şekil.Ek.1.1. Türkiye orman kaynaklı biyokütle potansiyeli haritası (Önenç, 2009)



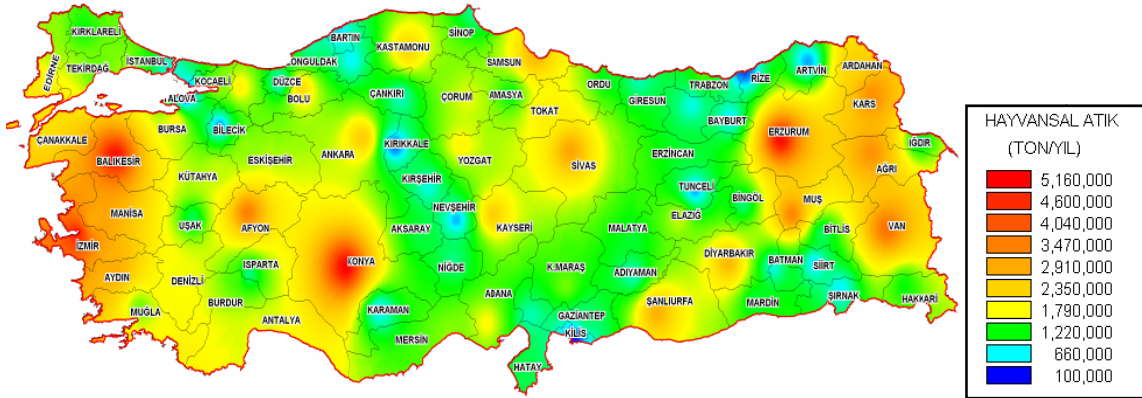
Şekil.Ek.1.2. Türkiye tarla ve bahçe kaynaklı tarımsal biyokütle artıkları potansiyel haritası (Önenç, 2009)



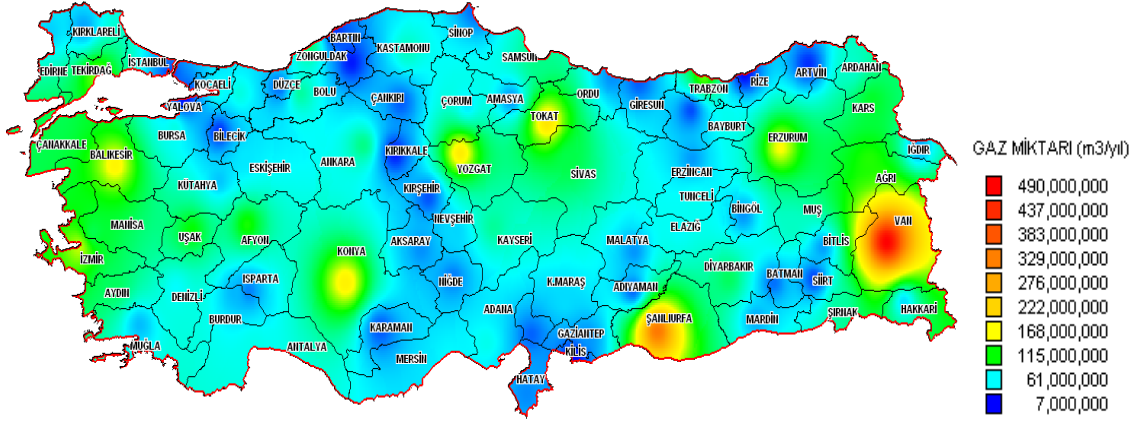
Şekil.Ek.1.3. Türkiye tarla ve bahçe kaynaklı tarımsal biyokütle artıkları yoğunluk haritası (Önenç, 2009)



Şekil.Ek.1.4. Türkiye hayvan varlığı dağılımı haritası (Önenç, 2009)



Şekil.Ek.1.5. Türkiye hayvansal atık miktarı dağılımı haritası (Önenç, 2009)



Şekil.Ek.1.6. Hayvansal atıklardan üretilebilecek biyogaz miktarı dağılım haritası (Önenç, 2009)

EK 2. Kocaeli İli Biyogaz Tesisinde Kullanılabilecek Atık Envanteri

Çizelge.Ek.2.1. İzmit Sebze ve Meyve Hali'nden alınan verilere göre atık miktarları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

KOCAELİ MERKEZ HALİNE AİT AYLIK ATIK MİKTARLARI (kg)													
Tür	Meyve	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
MEYVE	Domates	9.755	9.937	15.553	20.626	35.971	34.081	35.578	28.805	21.740	20.367	19.100	22.137
	Çilek	29	59	535	4.592	3.540	697	15	1.609	1.591	1.590	1.590	1.588
	Elma	6.299	6.091	5.866	3.704	530	169	290	19.804	24.252	36.069	36.513	38.130
	Karpuz	3	12	4	298	11.978	96.675	82.652	41.079	10.513	774	167	167
	Şeftali	0	0	0	0	90	4.972	6.193	7.150	2.406	227	67	67
	Greyfurt	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100	0	0	0	2.100	2.100	2.100
	Limon	14.100	14.100	14.100	14.100	14.100	14.100	14.100	0	14.100	14.100	14.100	14.100
	Mandalina	23.760	23.760	23.760	0	0	0	0	0	0	23.760	23.760	23.760
	Portakal	33.954	35.671	30.158	21.346	13.868	13.209	13.110	42.630	42.697	18.281	44.718	51.090
YEŞİL BİTKİ	Ispanak	1.314	1.234	1.224	995	491	105	157	201	562	977	1.460	1.122
	Fasulye	80	50	269	1.421	3.284	4.335	2.514	2.034	5.070	3.916	2.363	928
	Semiz otu	0	24	215	367	349	177	103	530	463	435	401	390
	Sivri biber	799	758	924	3.243	4.120	3.689	3.273	6.175	5.403	4.703	4.160	3.477
	Patlıcan	1.009	1.308	1.482	3.651	5.012	5.321	6.402	5.631	5.456	5.285	4.294	3.739
	Hıyar	1.750	1.732	4.029	8.686	13.059	9.822	6.067	7.087	6.238	8.572	14.683	8.586
	Kıvırcık	214	220	324	272	232	239	243	569	493	475	616	705
	Karalahana	695	766	677	430	147	51	7	3.980	3.916	3.570	3.081	2.576
	Taze soğan	3.923	4.353	5.260	4.768	7.965	5.688	7.544	50.516	45.349	36.966	29.398	23.504
	Patates	4.000	4.750	4.000	25.000	25.000	4.000	4.750	6.250	7.000	7.750	7.750	5.500
	Soğan	6.100	3.100	3.850	24.100	24.100	3.850	3.100	5.350	6.850	5.350	4.600	5.350
TOPLAM		109.883	110.025	114.329	139.700	165.936	203.280	186.098	229.397	204.101	195.266	214.919	209.015

Çizelge.Ek.2.2. Mezbahalardan elde edilen veriler ışığında aylara göre atık miktarları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

Ay	Tür	Bölgeler Bazında Miktarlar (kg.atık/ay)						Toplam
		İzmit	Uzun Çiftlik	Yuvacık	Gölcük	Körfez	Karamürsel	
Ocak	Büyükbaş	10.521	378	630	903	945	2.037	15.414
	Küçükbaş	2.065	15	0	65	385	870	3.400
	Toplam	12.586	393	630	968	1.330	2.907	18.814
Şubat	Büyükbaş	15.750	1.344	840	2.268	903	2.121	23.226
	Küçükbaş	2.450	0	5	185	140	945	3.725
	Toplam	18.200	1.344	845	2.453	1.043	3.066	26.951
Mart	Büyükbaş	15.498	1.575	1.092	399	966	3.360	22.890
	Küçükbaş	3.600	25	0	0	125	910	4.660
	Toplam	19.098	1.600	1.092	399	1.091	4.270	27.550
Nisan	Büyükbaş	16.821	2.268	819	2.142	1974	3.780	27.804
	Küçükbaş	5.860	110	0	0	75	1.450	7.495
	Toplam	22.681	2.378	819	2.142	2.049	5.230	35.299
Mayıs	Büyükbaş	20.160	2.982	1.050	2.247	2457	4.032	32.928
	Küçükbaş	7.400	65	0	10	650	1.835	9.960
	Toplam	27.560	3.047	1.050	2.257	3.107	5.867	42.888
Haziran	Büyükbaş	18.921	2.919	1.008	1.155	1.701	4.935	30.639
	Küçükbaş	7.945	45	0	55	450	2.115	10.610
	Toplam	26.866	2.964	1.008	1.210	2.151	7.050	41.249
Temmuz	Büyükbaş	21.462	2.667	1.239	2.373	1.827	5.166	34.734
	Küçükbaş	9.155	70	0	10	40	2.240	11.515
	Toplam	30.617	2.737	1.239	2.383	1.867	7.406	46.249
Ağustos	Büyükbaş	19.845	2.898	0	1.533	3.087	5.061	32.424
	Küçükbaş	7.125	20	0	280	60	2.330	9.815
	Toplam	26.970	2.918	0	1.813	3.147	7.391	42.239
Eylül	Büyükbaş	24.255	2.520	0	2.079	3.171	5.838	37.863
	Küçükbaş	7.140	0	0	0	450	1.530	9.120

Ay	Tür	Bölgeler Bazında Miktarlar (kg.atık/ay)						Toplam
		İzmit	Uzun Çiftlik	Yuvacık	Gölcük	Körfez	Karamürsel	
	Toplam	31.395	2.520	0	2.079	3.621	7.368	46.983
Ekim	Büyükbaş	20.475	2.982	0	1.680	3.255	5.271	33.663
	Küçükbaş	6.720	40	0	185	375	1.650	8.970
	Toplam	27.195	3.022	0	1.865	3.630	6.921	42.633
Kasım	Büyükbaş	17.598	2.625	0	840	2.730	3.465	27.258
	Küçükbaş	3.300	20	0	145	545	835	4.845
	Toplam	20.898	2.645	0	985	3.275	4.300	32.103
Aralık	Büyükbaş	15.645	2.289	0	1.029	2.667	1.953	23.583
	Küçükbaş	1.800	0	0	30	695	355	2.880
	Toplam	17.445	2.289	0	1.059	3.362	2.308	26.463
Toplam	Büyükbaş	216.951	27.447	6.678	18.648	25.683	47.019	342.426
	Küçükbaş	64.560	410	5	965	3.990	17.065	86.995
	Toplam	281.511	27.857	6.683	19.613	29.673	64.084	429.421

Çizelge.Ek.2.3. Çevredeki çiftliklerden elde edilebilir atık miktarları (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

No	Tesis Yeri	Tesis Büyükbaş Hayvan Potansiyeli (adet)		Atık Potansiyeli (t/gün)	
		Mevcut	Potansiyel	Mevcut	Potansiyel
1	Yuvacık	50	80	0,5	0,8
2	Kullar	40	120	0,4	1,2
3	Sarımeşe	30	100	0,3	1
4	Bayraktar	15	80	0,15	0,8
5	Uzunbey	20	200	0,2	2
6	Ketenceler	105	300	1,05	3
7	Yeniköy	50	350	0,5	3,5
Toplam		260	880	2,6	8,8

Çizelge.Ek.2.4. Kocaeli bölgesinde biçilen çimen miktarı (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

ÇİMEN ATIKLARI													
Miktar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam
Taze biçilmiş çimen atıkları (ton/ay)	0	0	800	800	800	800	800	800	800	800	0	0	6400
Toplam	0	0	800	800	800	800	800	800	800	800	0	0	6400

Çizelge.Ek.2.5. Ticari Kümes Dağılımı (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

İlçe Adı	Broiler Etlik Kümesi Kapasitesi (ad)	Yumurtacı Kümesi Kapasitesi (ad)	Damızlık Kümesi Kapasitesi (ad)	Hindi Kümesi Kapasitesi (ad)	Toplam Kümes Kapasitesi (ad)
İzmit	2.476.200	58.000	152.215	0	2.686.415
Gebze	1.011.720	402.000	152.500	12.054	1.578.274
Kandıra	3.089.500	8.300	0	144.450	3.242.250
Gölcük	32.000	290.700	0	0	322.700
Karamürsel	13.000	0	15.000	0	28.000
Körfez	225.000	0	0	0	225.000
Derince	248.580	0	0	0	248.580
Toplam	7.096.000	759.000	319.715	156.504	8.331.219

Çizelge.Ek.2.6. Aile Tipi Kanatlı Mevcut Adetleri (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

KOCAELİ	İzmit	Gebze	Kandıra	Gölcük	Karamürsel	Körfez	Derince
183.821	28.000	9.219	85.728	2.854	19.760	21.805	16.455

Çizelge.Ek.2.7. Kocaeli İlinde Bulunan Kanatlı Kesimhaneleri (Tübitak MAM Teknik Rapor-5, 2008).

İlçe	Firma Adı	Kapasite (adet/sa)
İzmit	Güncanlar Piliç	6000
Gebze	Pak Tavuk	4000
Gebze	Emre Tavuk	4000
TOPLAM		14000

Yukarıda verilen bilgiler ışığında yıllık gübre miktarı 180 000 ton/yıl olarak tespit edilmiştir (Bir tavuğun yıllık dışkılama miktarı 0,022 ton/yıl kabul edilmiştir).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Özge Ceren SABUNCU

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1980

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1993-1997 Karatay Süper Lisesi / Antalya

Lisans 1997-2001 İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce, Almanca

İş Tecrübesi:

2006-2009 Çalık Holding-Gap İnşaat Yatırım ve Dış Ticaret A.Ş. İstanbul

İş Geliştirme Şefi

2005-2006 İmece Uluslararası Mühendislik Yönetim ve Çevre Tek. Dan. A.Ş. İstanbul

İş Geliştirme Uzmanı

2004-2005 Özdemir-Hobas Boru Üretim San. ve Tic. A.Ş. Ankara

İş Geliştirme Uzmanı

2003-2004 Günsu Su Kimyasalları ve Cihazları San. ve Tic. A.Ş. Antalya

İş Geliştirme Uzmanı

2002-2003 Fraunhofer Umsicht Oberhausen/Almanya

Proje Sorumlusu