

**KÜMES HAYVANI ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN
BİYOGAZIN BENZİNLİ MOTORLARDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Halis DEVİREN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ
EKİM-2012**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KÜMES HAYVANI ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN BİYOGAZIN
BENZİNLİ MOTORLARDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halis DEVİREN

(091119109)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Eylül 2012

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Ekim 2012

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Cengiz ÖNER (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. H. Lütfü YÜCEL (F.Ü)

EYLÜL-2012

ÖNSÖZ

Dünyadaki petrol ve petrol türevli yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, doğada küresel ısınma gibi telafisi mümkün olmayan tahribatlara sebep olmalarından dolayı ve fosil kökenli yakıtların tükenebilir olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilebilmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Türkiye gibi enerji bakımından kendi ihtiyacını karşılayabilecek fosil kökenli enerji kaynakları rezervlerine sahip olmayan ülkeler, yakıldığı zaman atmosfere daha az zararlı emisyon salan, maliyeti ucuz, güvenli, sürekli ve kaynak bakımından doğada ki döngü ile yenilenebilen enerji kaynaklarına yönelmesi gerekmektedir. Bu kaynaklardan biri olan, hayvansal, şehir ve endüstriyel atıkların anaerobik fermantasyonu sonucu elde edilebilen biyogaz, çevreye zararlı olan organik atıkların değerlendirilmesi ve yerli üretim olup enerjide dışa bağımlılığı daha düşük seviyelere indirgemesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları çalışmaları arasında önemli bir yere sahiptir.

Tez çalışmam süresince, bilgi ve tecrübesiyle beni bu konuda yönlendiren, daima yol gösteren değerli hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu eğitim seviyesine kadar, bana verdikleri emeklerinin karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim değerli anne, babam ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Çalışma boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Cengiz ÖNER, Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Atölye ve Laboratuvar çalışanlarına, GMY Reksan Motor Yenileme Gn. Müdürü Sn. Lütfi BOZCAN'a, YTU Süleyman YILDIRIM'a ve Kapak Test Bölümü Sorumlusu Sn. Muhammet AYDIN'a ayrıca Dinçler Otogaz Gn. Müdürü Bünyamin DİNÇ ve tüm çalışanlarına sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Halis DEVİREN

ELAZIĞ-2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLOLAR LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. TEMEL BİLGİLER.....	8
3.1. Biyokütle Enerjisi.....	8
3.2. Anaerobik Fermentasyon ve Biyogaz Üretimi.....	12
3.2.1. Anaerobik Arıtımın Temelleri.....	13
3.2.1.1. Mikrobiyoloji.....	13
3.2.1.2. Anaerobik Arıtımın Biyokimyası	14
3.3. Biyogaz.....	16
3.3.1. Biyogazın Oluşum Aşamaları	16
3.3.1.1. Hidroliz.....	19
3.3.1.2. Asidojenesis.....	19
3.3.1.3. Asetojenesis.....	20
3.3.1.4. Metanojenesis	20
3.3.2 Anaerobik Bozunma Sonucu Elde Edilen Gaz Kalitesi	21
3.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Anaerobik Reaktörler.....	22
3.4.1. Kesik besleme (Batch –Beklemeli Sistem)	24
3.4.2. Sürekli Beslemeli Tek Aşamalı Sistemler.....	25
3.4.3. Sürekli Beslemeli İki Aşamalı Sistemler.....	27
3.5. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler	28
3.5.1. Sıcaklık.....	29
3.5.2. Hidrolik Bekleme Süresi	34

3.5.3.	Organik Yükleme Hızı	36
3.5.4.	pH ve Alkalinite	38
3.5.5.	C/N Oranı	40
3.5.6.	Mikroorganizma Konsantrasyonu	42
3.5.7.	Karıştırma	42
3.5.8.	İnhibitör ve Toksik Maddelerin Etkisi	44
3.6.	Türkiye’de Tavuk İşletmeciliği ve Atık Problemi	47
3.6.1.	Tavuk Yetiştiriciliği	47
3.6.2.	Tavuk Atık Üretimi ve Atıkların Özellikleri	49
3.6.3.	Tavuk Gübresinin Özellikleri	51
3.7.	Biyogaz Tesislerinin Avantajları ve Dezavantajları	52
3.7.1.	Biyogaz Tesislerinin Avantajları	52
3.7.2.	Biyogaz Tesislerinin Dezavantajları	54
3.8.	AB ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyogaz Üretimi	54
3.8.1.	AB’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyogaz Üretimi	55
3.8.2.	Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Biyogaz Üretimi	57
3.9.	Biyogazın Arıtılması – Biyometan	60
3.9.1.	Desülfürizasyon (H ₂ S Giderimi)	63
3.9.1.1.	Fermentörde Biyolojik Desülfürizasyon	65
3.9.1.2.	Harici Reaktörlerde Biyolojik Desülfürizasyon – Damlatmalı Filtre Yöntemi	67
3.9.1.3.	Biyokimyasal Gaz Yıkama – Biyo Yıkayıcı	68
3.9.1.4.	Sülfadın Çökeltilmesi	70
3.9.1.5.	Aktif Karbon Adsorbsiyonu	70
3.9.2.	Karbondioksit Ayrışması	71
3.9.2.1.	Basınç Değişimli Adsorbsiyon (PSA)	73
3.9.2.2.	Basıncılı Suyla Yıkama (DWW)	74
3.9.2.3.	Kimyasal yıkama (Amin)	75
3.9.2.4.	Fiziksel Yıkama (Seleksol, Genosorb)	76
3.9.2.5.	Membran yöntemi	77
3.9.2.6.	Cryogen Ayırma	77
3.9.3.	Kurutma	78

3.9.3.1. Yoğunlaştırarak Kurutma	78
3.9.3.2. Adsorbsiyon Kurutması.....	79
3.9.3.3. Absorbsiyon Kurutması.....	79
3.9.4. Diğer Eser Gazların Ayrılması	79
3.10. Biyogaz Kullanım ve Uygulama Alanları	80
3.10.1. Biyogazın Güç-Isı Kuplajıyla Kullanımı	82
3.10.1.1.İçten Yanmalı Motorlu Kombine Isı ve Güç Santralleri	86
3.10.2. Stirling Motorları.....	88
3.10.3. Mikrogaz Türbinleri	90
3.10.4. Yakıt Hücreleri	92
3.10.5. Elektrikle Çalışan Güç-Isı Kuplajında Atık Isı Kullanımı	94
3.10.5.1.Isı hazırlanması/Isı dağılımı (Yakın Isı Şebekeleri).....	94
3.10.5.2.Soğuk Üretimi	95
3.10.5.3.Ardıl Elektrik Kazanımı Konseptleri	97
3.10.6. Doğalgaz Şebekesine Biyogaz Beslemesi.....	97
3.10.7. Biyogazın Termik Kullanımı.....	98
3.10.8. Taşıtlar İçin Yakıt.....	99
4. MATERYAL ve METOT	106
4.1. Çalışmanın Amacı	106
4.2. Deneysel Çalışmalar	106
4.3. Biyogaz Reaktörü	107
4.4. Biyogaz Reaktörünün Sıcaklığının Sabit Tutulması	109
4.5. pH Değerinin Optimum Değere Getirilmesi	110
4.6. Fermentöre Eklenen Aşı Madde.....	112
4.7. Çürütücü İçerisindeki Substratın Karıştırılması	112
4.8. Elde Edilen Biyogazın İçerisinden CO ₂ ve H ₂ S'in Ayrıştırılması	113
4.9. Elde Edilen Biyogazın Depolanması ve Nem Giderimi.....	114
4.10. Benzinli Deney Motorunun Biyogaz Motoruna Dönüştürülmesi	116
5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	119
KAYNAKLAR	124
ÖZ GEÇMİŞ	147

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de atık ürünün işlenmesi ile elde edilmekte olan biyogazdır. Biyogaz ile organik atıkların bertarafı sağlanırken beraberinde enerji de üretilmektedir. Farklı enerji kaynaklarından elde edilen biyogaz, aynı zamanda tavuk gübresinden de elde edilebilmekte olup, önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir.

Biyogaz, biyokütlenin havasız ortamda çeşitli bakteri gruplarının faaliyetleri sonucunda üretilmekte olan bir gazdır. İlk elde edilen biyogaz % 40 – 70 metan (CH_4), % 30 – 60 karbondioksit (CO_2), nem ve eser miktarda hidrojen sülfür (H_2S) içerir. Biyogazın içerisinde CO_2 ve H_2S 'in varlığı biyogazın kullanımını olumsuz yönde etkiler.

Büyük kapasiteli tesislerde üretilen biyogaz arıtdıktan sonra direkt olarak doğalgaz sistemine beslenebilir, elektrik üretiminde ve taşıt yakıtı olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, Biyogaz Üretimi, Biyogaz Saflaştırma, Yenilenebilir Enerji

SUMMARY

Examination of Gasoline Engines, the Availability of Biogas Derived from Poultry Waste

One of renewable energy resources is also biogas produced by processing waste product. While organic wastes are treated energy can also be produced via biogas production. The biogas produced out of different energy resources can be produced out of chicken manure as well and can be turned to account as an important alternative energy resource.

The biogas is a gas of produced during fermentation process of biomass under the anaerobic condition as a result of various bacterial groups' activities. The first obtained biogas contains 40-70% of methane (CH_4), 30-60% of carbon dioxide (CO_2), moisture and small amounts of hydrogen sulfide (H_2S). (The presence of CO_2 and H_2S in the biogas adversely affects the use of this gas.

Large capacity plants produced biogas after purification can be directly supply to the natural gas grid, can be used in electricity generation and as a fuel for car.

Keywords: Biogas, Biogas Production, Biogas Upgrading, Renewable Energy

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1.	Anaerobik ayrışma basamaklarının genel gösterimi.....	14
Şekil 3.2.	Anaerobik bozunmanın şematik tanımı	21
Şekil 3.3.	Fermentasyon artığı deposu açık sürekli beslemeli sistemin akış yöntemi şeması.....	23
Şekil 3.4.	Fermentasyon artığı deposu kapalı sürekli beslemeli sistemin akış yöntemi şeması.....	24
Şekil 3.5.	Kesik beslemeli reaktör.....	27
Şekil 3.6.	Sürekli beslemeli tek aşamalı bir reaktör	21
Şekil 3.7.	Sürekli beslemeli iki aşamalı bir reaktör	28
Şekil 3.8.	Sakrofilik mezofilik ve termofilik, termofolik sıcaklıklarda metanogenislerin büyüme oranı	31
Şekil 3.9.	Günümüzde dünyada kurulu olan tesislerde kullanılan sıcaklık dağılımı ...	32
Şekil 3.10.	pH farklı değerlerdeki metan bakterisinin elektronik mikroskopla görüntüleri (10 µm).....	39
Şekil 3.11.	Bir tavuk yetiştirme çiftliğinde atıkların işlenme süreci.....	49
Şekil 3.12.	AB enerji kaynakları kullanımı.....	56
Şekil 3.13.	Türkiye genel enerji tüketimi dağılımı	58
Şekil 3.14.	Biyogazı yıkama yöntemi	69
Şekil 3.15.	Biyogaz saflaştırma ünitesi	75
Şekil 3.16.	Bir kojenerasyon santralinin yapısı ASUE (Tasarruflu ve Çevre Dostu Enerji Tüketimi için Çalışma Grubu Derneği).....	83
Şekil 3.17.	Birleşik ısı ve güç santralinin şematik görünüşü	83
Şekil 3.18.	Türkiye’de birleşik ısı ve güç sistemlerinin kullanıldığı alanlar	84
Şekil 3.19.	Konvansiyonel elektrik ve ısı üretimi ile kojenerasyon ünitelerinin verimlerinin karşılaştırılması	85
Şekil 3.20.	Bir stirling motorunun çalışma tarzı	89
Şekil 3.21.	Bir mikrogaz türbininin yapısı	90
Şekil 3.22.	Bir yakıt hücresi çalışma prensibi.....	92
Şekil 3.23.	Bir absorpsiyon soğutma makinesinin çalışma şeması.....	96
Şekil 4.1.	Atığın hazırlanması için el matkabına göre dizayn edilmiş karıştırıcı	107
Şekil 4.2.	Biyogaz üretmede kullanılan fermentör.....	107
Şekil 4.3.	Isıtma amaçlı kullanılan suyun ve gübrenin konulduğu hazneler.....	108
Şekil 4.4.	Biyogaz reaktörü	109
Şekil 4.5.	Elektronik kontrol ünite	110
Şekil 4.6.	pH değerini yükseltmek için kullanılan materyaller.....	111
Şekil 4.7.	pH değerini yükseltmek için sönmüş kireç eklenmesi.....	111
Şekil 4.8.	Fermentöre Eklenen Aşı.	112
Şekil 4.9.	Elektrik motorunu tetikleyen zamanlayıcı	113
Şekil 4.10.	H ₂ S gideriminde kullanılan demir tozu kolonu	113
Şekil 4.11.	CO ₂ giderimi için kullanılan içerisinde su bulunan tüp	114
Şekil 4.12.	Biyogaz depolama ünitesi	115
Şekil 4.13.	Filtre kabına konan silika – jel	115

Şekil 4.14.	Biyogaz çıkış vanasına bağlanan filtre ve şartlandırıcı.....	116
Şekil 4.15.	Deney motoruna takılmış olan regülatör.....	117
Şekil 4.16.	Deney motoruna takılmış olan mikser	117
Şekil 4.17.	Elde edilen biyogazın yakıldığı deney motoru	118
Şekil 5.1.	Tavuk gübresinden elde edilen biyogazın basınç eğrisi	119
Şekil 5.2.	Sıcaklığın uzun süre düşmesi sonucu inhibe olan sistemin basınç değişimi...	120
Şekil 5.3.	Biyogaz yakıtının CO emisyonuna etkisi	122
Şekil 5.4.	Biyogaz yakıtının HC emisyonuna etkisi	123
Şekil 5.5.	Biyogaz yakıtının CO ₂ emisyonuna etkisi	124

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Biyokütle kaynaklarında kullanılan çevrim teknikleri, elde edilen yakıtlar ve uygulama alanları.....	10
Tablo 3.2.	Türkiye birincil enerji kaynakları üretimi.....	11
Tablo 3.3.	Türkiye birincil enerji kaynakları tüketimi.....	11
Tablo 3.4.	Türkiye’de biyokütle enerji potansiyeli.....	12
Tablo 3.5.	Türkiye’de geçmişte, günümüzdeki ve gelecekte planlanan biyokütle enerji üretimi (TEP).....	12
Tablo 3.6.	Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları.....	14
Tablo 3.7.	Anaerobik bozunma sonucu elde edilen biyogaz bileşimi.....	22
Tablo 3.8.	Anaerobik fermentasyon çevresel gereklilikleri.....	29
Tablo 3.9.	Organik maddelerin C/N oranı.....	41
Tablo 3.10.	Anaerobik bozunma proseslerinde zararlı maddeler ve zararlı konsantrasyonları.....	47
Tablo 3.11.	Türlerine göre kümes hayvanları sayısı.....	48
Tablo 3.12.	Kümes çiftliklerinde ve kümes hayvanları kesim yerlerinde üretilen organik katı atıkların miktarı ve özellikleri.....	50
Tablo 3.13.	Değişik tavuk atıklarının gübre olarak besin bileşimi.....	51
Tablo 3.14.	Nem düzeyine göre tavuk gübresinin bileşimi.....	52
Tablo 3.15.	Biyogaz üretilmiş ve normal koşullarda elde edilmiş gübrelerin kimyasal özellikleri.....	52
Tablo 3.16.	AB ülkeler bazında biyogaz birincil enerji üretimi.....	57
Tablo 3.17.	Bölgesel bazda kullanılabilir tarımsal kaynaklı atık miktarları.....	59
Tablo 3.18.	Türkiye'nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz üretimi....	59
Tablo 3.19.	Kullanım alanına göre biyogaz içindeki metan harici kimyasalların sahip olması gereken değerler.....	10
Tablo3.20.	İsveç standartlarına göre (SS 155438) taşıt yakıtı olarak kullanılan biyogazın sahip olması gereken değerler.....	63
Tablo 3.21.	Desülfürizasyon işlemi sürecine genel bakış.....	65
Tablo 3.22.	Fermentördeki biyolojik desülfürizasyonun referans değerleri ve uygulama parametreleri.....	66
Tablo 3.23.	İçerdiği H ₂ S miktarına göre biyogaza verilmesi gereken hava ve oksijen miktarları.....	67
Tablo 3.24.	Harici biyolojik desülfürizasyon sistemlerinin referans değerleri ve uygulama parametreleri.....	68
Tablo 3.25.	Harici biyokimyasal gaz yıkayıcılarının referans değerleri ve uygulama parametreleri	69
Tablo 3.26.	Dâhili kimyasal desülfürizasyonda referans değerler;.....	70
Tablo 3.27.	Aktif karbon ile desülfürizasyonda referans değerler.....	71
Tablo 3.28.	Metan zenginleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	72
Tablo 3.29.	Bazı gazların 20 °C ve 1 Atm basınçta sudaki çözünürlüğü.....	74
Tablo 3.30.	Gazlı benzinli motorların referans değerleri ve uygulama parametreleri	87
Tablo 3.31.	Çift yakıtlı motorların referans değerleri ve uygulama parametreleri	88
Tablo 4.1.	Ekotest egzoz gaz analizörü özellikleri.....	118

SEMBOLLER LİSTESİ

C	: Karbon
CaCO₃	: Kalsiyum Karbonat (Kireç Taşı)
CH₄	: Metan Gazı
CO	: Karbon Monoksit
Co	: Kobalt
COOH	: Karboksilik Asit
CO₂	: Karbondioksit
H₂	: Hidrojen
HC	: Hidrokarbon
H₂O	: Su
H₂S	: Hidrojen Sülfür
H₂SO₃	: Sülfüroz Asit
H₂SO₄	: Sülfürik Asit
K	: Potasyum
KOH	: Potasyum Hidroksit
Mo	: Molibden
N	: Azot
NH₃	: Amonyak
NH₄	: Amonyum
Ni	: Nikel
NO₃	: Nitrat
NO_x	: Azot Oksit
P	: Fosfor
P₂O₅	: Fosfor Pentaoksit
Se	: Selenyum
SO₂	: Kükürt Dioksit

KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
SSCB	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
GWh	: Giga Watt Hour
pH	: Power of Hydrogen
UK	: Uçucu Katı
TKN	: Toplam Kjeldahl Azotu
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
UASB	: Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Yatağı
OLR	: Organik Yükleme Hızı
UKM	: Uçucu Katı Madde
MW	: MegaWatt
MJ	: Mega Joule
Mt	: Mega Ton
PJ	: Penta Joule
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
C/N	: Karbon Azot Oranı
B_R	: Yükleme Oranı
HRT	: Hydraulic Retention Time (Hidrolik Bekleme Süresi)
V_R	: Reaktör Hacmi
$\dot{V}$	: Her Gün Eklenen Materyal Miktarı
B_R	: Yükleme Oranı
$\dot{m}$	: Bir Zaman Diliminde Eklenen Materyal Miktarı
c	: Organik Materyal Konsantrasyonu
OKM	: Organik Kuru Madde
TK	: Toplam Katı
TKM	: Toplam Katı Madde
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
MTEP	: Milyon Ton Eşdeğer Petrol
PPM	: Parts Per Million
PSA	: Pressure Swing Adsorption (Basınç Değişimli Adsorbsiyon)
DWW	: Basınçlı Suyla Yıkama
MEA	: Mono Ethanolamin
DEA	: Di Ethanolamin
MDEA	: Methyl Di Ethanolamin
TEA	: Tri Ethanolamin
ASUE	: Tasarruflu ve Çevre Dostu Enerji Tüketimi için Çalışma Grubu Derneği.
TA	: Teknik Talimat
BHKW	: Kombine Isı ve Güç Santrali
PEM	: Polimer Elektrolit Membran
PAFC	: Phosphoric Acid Fuel Cell
MCFC	: Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell
ORC	: Organic Rankine Cycle
KWK	: Güç-Isı Kuplajı

1. GİRİŞ

Enerji temel iki kaynaktan sağlanmaktadır. Bunlar; yenilenemeyen ve yenilenebilen enerji kaynaklarıdır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının sanayi devriminin başlamasından günümüze kadar bilinçsizce tüketilmesi tehlike çanlarının çalmasına sebep olmuştur. En iyimser hesaplar bile yenilenemeyen enerji kaynaklarının (Petrol, kömür, doğalgaz v.b.) yakın bir gelecekte tükeneceğini göstermektedir. Oysa gelişmeye paralel olarak enerji tüketimi de artmaktadır. Bu durumda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek, dolayısı ile yenilenemeyen enerji kaynaklarının tükenme sürecini yavaşlatmak bir zorunluluk olmuştur. Dünyada tüm ülkeler bu konuda yoğun çabalar içindedirler [1].

Fosil enerji kaynaklarının (petrol, kömür, doğalgaz vb.) tükenebilir olması, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş, hidrolik, jeotermal, vb.) yatırım değerlerinin fazla olması özellikle kırsal bölgelerde yenilenebilir enerji kaynağı olarak biyogazın değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bitkisel, hayvansal, şehir ve endüstriyel atıkların anaerobik fermentasyonu sonucu elde edilen biyogaz, içeriğindeki metan gazından dolayı yanabilme özelliğine sahiptir. Biyogaz fosil yakıtlardan farklı olarak karbondioksit emisyonunu artırmamakta ve sera etkisinin azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca sanayileşme ve kalkınmanın temel unsurlarından biri enerjidir. Dünya nüfusunun artışı ve gelişen teknolojiye paralel olarak enerjiye olan talep sürekli artmaktadır. Enerji bakımından kendine yeterli olmayan ülkelerde, çevre açısından temiz, güvenli, sürekli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. İçinde % 55-65 oranında CH₄ (Metan) olan biyogaz, bu özellikleri sağlayabilir [2].

Özellikle 1973 enerji krizinden sonra, ulusal ve uluslararası enerji problemleri günlük yaşamın bir parçası haline gelmiş, alternatif (yenilenebilir) enerji kaynakları üzerine çok yoğun bir şekilde araştırmalara başlanmıştır. Bu yeni enerji kaynaklarının bulunması, enerji teknolojisinin geliştirilmesi, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde çalışmaların yoğunlaştığı alanlar olmuştur. Bu alanlar temiz enerji kaynakları olarak adlandırılan jeotermal, güneş, rüzgâr, hidrojen, biyodizel ve biyogaz enerjileri son yıllarda üzerinde en çok durulan ve araştırılan konuları oluşturmaktadır [3].

Biyokütle enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Anaerobik biyoteknoloji, çevre kirliliğine neden olan atıkların arıtımını sağlaması hem de değerli bir yan ürün olan metan gazı üretebilmesi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında dikkat çekmektedir. Ayrıca, işletme ve yatırım maliyetlerinde büyük üstünlüklerinden dolayı, dünyanın birçok bölgesinde anaerobik biyoteknolojinin katı-sıvı bütün organik maddelerin giderilmesinde kullanımı giderek artmaktadır. Yoksul ülkelerde yerel olanaklarla yapılan ilkel üretim girişimlerinin yanı sıra, zengin ülkelerde biyogaz teknolojisi endüstriyel anlamda da uygulanmaktadır. Biyokütle enerjisinin sanayileşmiş ülkelerdeki birincil enerji tüketimindeki payı genel olarak % 3' ün altında ise de bazı ülkeler bu kaynağı önemli ölçüde kullanmaya başlamıştır. Örneğin, Finlandiya % 15, İsveç % 9, ABD (Amerika Birleşik Devletleri) % 4, eski SSCB (Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği) ülkeleri % 3-4 oranında biyokütle enerjisi kullanmaktadır. ABD ve AB ülkelerinde çeşitli büyüklüklerde binlerce işleyen tesis vardır ve sayıları hızla artmaktadır [4].

Türkiye'de yaygın olarak tavuk çiftliği atığı üretilmektedir. Üretilen bu atıklar önemli miktarda biyogaz potansiyeli oluşturmaktadır. 2000 yılında yapılmış olan bir çalışmada, tavuk gübresinin biyogaz miktarı ve eşdeğer enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Buna göre tavuk üretme çiftlikleri kaynaklı yaş atık miktarı 14×10^6 ton/yıl olduğu hesaplanmıştır. Bu atıklardan elde edilecek metan gazı miktarı tavuk yaş atığı için 426×10^6 m³/yıl olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerin enerji potansiyeli olarak karşılığı, 533 GWh/yıl'dır. Bu atıkların %100 verimle biyogaza dönüştürüldüğü düşünüldüğünde, Türkiye 1998 yılı enerji gereksinimine 114 024 GWh (Giga Watt Hour) oranı % 0,46 olarak hesaplanmıştır [5].

Özellikle yenilenebilir enerji kaynakları enerji potansiyellerinin yanında çevre ile uyumlu oluşları nedeniyle önemli bir ilgi odağı olmaktadır. Çevresel sorunlar oluşturan atıkların işlenerek zararsız hale getirilmesi ve enerji eldesin de kullanılabilmesini sağlayan biyogaz teknolojisi, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynamaya adaydır [6].

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Anozie ve arkadaşları (2005), yapmış oldukları çalışmalarında 58 cm eninde, 106 cm uzunluğunda 0,28 m³ lük pilot ölçekli kesikli biyogaz reaktörü kurarak 40 günlük bekleme süresinde dört farklı atıktan biyogaz üretimini incelemişlerdir. Reaktör hacminin yarısı (140 litre) kullanılmıştır. Atık olarak tavuk dışkısı, mısır sapı, sığır dışkısı ve bunların karışımını (aynı miktarlarda alınarak) kullanmışlardır. Her nemli atıktan 48,9 gram alarak 1:1 oranında suyla karıştırarak besleme olarak kullanmışlardır. Günlük ortalama gaz üretimi en fazla (137 litre) tavuk dışkısından, en az ise (16,38 litre) mısır sapından elde edilmiştir. Sığır dışkısından günlük ortalama 17,78 litre, karışımdan 18,16 litre biyogaz elde edilmiştir. Biyogaz üretimi tavuk dışkısından ikinci günde, mısır sapından altıncı günde, sığır dışkısından üçüncü günde başlamıştır. Reaktörün pH (Power of Hydrogen) değeri 6,7 – 7,4 arasında, sıcaklığı ise 25 °C – 29 °C arasında değişmiştir. Üretilen biyogaz % 60 oranında metan içermektedir [7].

Fadime T., ve arkadaşları (2003), yapmış oldukları araştırmalarında termal, asidik kimyasal ve asidik termokimyasal önışlemlerin, tavuk gübresindeki katının suda çözünürlüğü ve tavuk gübresinin biyogaz ve metan üretim verimine etkilerini araştırmışlardır. Önışlemler, tavuk gübresinin kütlegece % 10 katı madde içeren sulu karışımlarına, karışımdaki katı maddenin % 10, % 15 ve % 20'si kadar H₂SO₄ (Sülfürik Asit) eklenerek ve kimyasal madde kullanmadan, oda sıcaklığında ve suyun normal kaynama sıcaklığında, bir ve ikişer saat sürelerde uygulanmıştır. Elde edilen sulu fazlara 30 °C'de, pH=6-7'de ve 30 günlük süreyle anaerobik işlem uygulamışlardır. Çalışma sonunda, tavuk gübresinden biyogaz ve metan üretim verimlerinde asidik termokimyasal önışlemlerin etkili olduğunu belirlemişlerdir [8].

Sadaka ve arkadaşlarının (2000), yapmış oldukları çalışmalarında biyogaz üretimiyle domuz, kümes hayvanları ve sığır dışkılarının anaerobik olarak ayrışması konusunda çalışma yapmıştır. Hayvan dışkılarının çürütülmesinden biyogaz üretiminin potansiyelini değerlendirmek amacıyla bir kesikli anaerobik ayrışma süreci araştırılmıştır.

Çürüme zamanının ve başlangıçtaki toplam katı içeriğinin biyogaz dönüşümüne etkisi ve domuz, kümes hayvanları ve sığır dışkılarının çürütülmesi sırasında katı miktarındaki azalma incelenmiştir. UK'daki (Uçucu Katı) azalma reaktördeki başlangıç katı içeriğinin azalmasıyla çok az olarak artmıştır. Ayırışma sırasında pH değerleri sabit ve anaerobik ayırışma için uygun olarak tutulmuştur. Proses esnasında TKN (Toplam Kjeldahl Azotu) ve amonyak azotundaki azalma KOİ'deki (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) azalmayla benzerlik göstermiş ve reaktörlerdeki düşük başlangıç katı içeriği için daha fazla azalma gözlenmiştir. Tüm dışkı türleri için reaktördeki katı içeriğinin azalmasıyla biyogaz üretimi artmıştır. En düşük başlangıç katı içeriği (12-14%) için domuz dışkısı daha çok biyogaz üretmiş, fakat yüksek başlangıç katı içeriklerinde dışkı türlerine göre biyogaz üretiminde çok az farklılık görülmüştür. Sonuçlara göre düşük katı içerikleri ile uygun biyogaz üretim hızı ve uygun uçucu katı azalması elde etmek için mikroorganizma nüfusunun ortama alıştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır [9].

Kalyuzhnyi ve arkadaşları (1998), yaptıkları çalışmalarında, tavuk dışkısının sıvı kısmının UASB (Yukarı Akışlı Anaerobik Çamur Yatağı) reaktörlerinde anaerobik artımını incelemişlerdir. Bunun için 35 °C'de 2 L ve 6 L laboratuvar ölçekli iki UASB reaktörlerinde çalışmışlardır. Aşı olarak sentetik atık su işleten UASB reaktöründen alınan tanecikli çamur kullanılmıştır. Reaktöre besleme yapılmadan önce atığa 1-2 günlüğüne 18-20 °C'de ön asitleştirme işlemi uygulanmıştır. Başlangıç KOİ değerleri olarak 10,5-20 g/L arasında değerlerle, uçucu yağ asitleri değişimleri değerleri olarak 3,9-6,7 g KOİ/L arasında değerlerle ve 6,2-7,1 pH aralığında değerlerle deneyler yapılmıştır. Başlangıç OLR (Organik Yükleme Hızı) 1 g KOİ/L.gün-1 olarak belirlenmiş ve kademeli olarak 11-12 g KOİ/L.gün-1 arasındaki değerle arttırılmıştır. Bu organik yükleme hızlarında, 1-2 gün arasında alıkoyulma sürelerinde çalışılmıştır. Deneyler sonucunda en yüksek gaz üretimleri 2 l'lik reaktörde (3,59 L gaz/ l.gün-1), 12,07 g KOİ/L.gün-1 yükleme hızında gerçekleşmiştir. 0,87 gün alıkoyulma süresinde, 6 L'lik reaktörde (3,51 L gaz/ l.gün-1), 11,05 g KOİ/L.gün-1 yükleme hızında, 1,81 alıkoyulma süresinde gerçekleşmiştir. En yüksek KOİ giderimi 2 L'lik reaktörde (% 91), 5,97 g KOİ/L.gün-1 yükleme hızında, 3,35 gün alıkoyulma süresinde, 6 L'lik reaktörde ise 5,52 g KOİ/L.gün-1 yükleme hızında, 3,62 gün alıkoyulma süresinde gerçekleşmiştir. Tüm deneylerde üretilen gazlardaki metan içeriği %78-82 arasında değişmektedir. Her iki reaktörde de organik yükleme hızı arttıkça

KOİ giderimi azalırken oluşan gaz miktarı artmaktadır ve gazların metan içeriğinde önemli derecede değişiklik görülmemektedir [10].

Bujoczek ve arkadaşlarının 2000 yılında yaptıkları bir çalışmada yüksek katı içerikli tavuk gübresinin anaerobik arıtımı incelenmiştir. Deneyler 35 °C sıcaklıkta, 160 mL'lik şişelerde, 119 gün (17 hafta) alıkoyulma sürelerinde gerçekleştirilmiştir. %21,7 toplam katı içeriğine sahip taze gübre (yaklaşık 3 saatlik) ve iki çeşit aşı değişik katı oranlarında (%5-%21,7) karıştırılmıştır. Aşı olarak taze gübrenin bir çukurda 6 ay kadar bekletilmesiyle oluşan gübre ve anaerobik arıtım çamuru kullanılmıştır. Ayrıca taze gübrenin aşı kullanılmadan değişik seyreltmeleri de incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda % 10,3 katı oranının en uygun olduğu, anaerobik arıtma çamurunun 6 ay bekletilerek elde edilen tavuk gübresinden daha üstün nitelikte aşı olduğu belirlenmiştir. Bütün denemeler içerisinde metan üretimi ve arta kalan uçucu yağ asitleri bakımından en fazla sindirimin (473 mL CH₄/g UKM (Uçucu Katı Madde) giderilen) %40 taze gübre, %60 anaerobik arıtım çamuru karışımından (%10,3 lük katı oranında) elde edildiği belirlenmiştir. Serbest amonyanın 250 mg/L üzerindeki değerlerinin metan üretimini durdurduğu gözlemlenmiştir. Sadece taze gübre kullanılan deneyler arasında metan üretimi (548 mL CH₄/g UKM giderilen) bakımından en uygun karışımın % 5 katı oranına seyreltilen karışım olduğu belirlenmiştir [11].

Oerther, (2006), 21. yüzyılda anaerobik parçalanma üzerine yaptıkları araştırmada anaerobik parçalanmanın tercih edilmesinde prosesin performansının ve ekonomik gelirinin yüksek olmasının en önemli sebep olduğunu bildirmiştir. Oerther aynı çalışmasında organik katı maddenin enerjiye dönüşüm kapasitesi, hidrojen ve asitler gibi faydalı ürünlerin üretilme performansı ve biyokatıların stabilizasyonu ile aynı zamanda patojenlerin giderilmesi gibi pozitif özelliklerini bildirerek anaerobik arıtımın önemini vurgulamıştır [12].

Callaghan ve arkadaşları (2002), yılında yapmış oldukları bir çalışmada, sığır gübresine değişik oranlarda sebze atıkları, meyve atıkları ve tavuk gübresi karıştırmışlar, karışımların anaerobik arıtmalarını sürekli karıştırılmalı tank reaktörde incelemişlerdir. Deneylere başlamadan önce sebze ve meyve atıkları %10'a (ağırlık/hacim), tavuk gübresi %15'e (ağırlık/hacim), sığır gübresi ise % 7,6'ya (ağırlık/hacim) seyreltilmiştir. Reaktör

hacmi 18 litre, çalışma sıcaklığı ise 35 °C'dir. Alıkoyulma süresi 21 gün olarak, yükleme hızı ise 3,19–5,01 kg UK/m³gün arasında tutulmuştur. Sığır gübresine diğer atıklar karıştırılmadan önce sığır gübresi ile 4 ay süresinde çalışılmış, daha sonra tüm karışım oranlarında 28'er gün çalışılmıştır. Sığır gübresi ve meyve ve sebze atıkları karışımında meyve ve sebze atıklarının karışımdaki oranı % 20'den % 50'ye (ağırlıkça) çıkarılınca; metan miktarı 0,23 m³CH₄/kg UK eklenenden 0,45 m³CH₄/kg UK eklenene çıkmıştır. Bu etki UK gideriminde önemsiz derecede azalmaya neden olmuştur. Sığır gübresinde ve tavuk gübresi karışımındaki tavuk gübresi oranı arttıkça hem metan üretiminde hem de UK gideriminde azalma görülmüştür. Buna amonyak zehirlenmesi neden olmuştur [13].

Mahanta ve arkadaşlarının (2004), yapmış oldukları çalışmada, bir biyogaz reaktörünün gaz üretim hızına sıcaklığın ve toplam katı derişiminin etkisi laboratuvar ölçekli deneyler yapılarak incelenmiştir. Sıcaklık kontrolü altında kesikli reaktörlerle gaz üretim hızı çalışılmıştır. Toplam katı derişimleri % 2,5, % 8 ve % 12,5 olan sığır dışkısı-su karışımlarıyla çalışılmıştır. Reaktörlerin 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C sabit sıcaklıklarda olması sağlanmış, haftalık olarak pH ölçümü yapılmıştır. Bu çalışma, 35 °C'de ve toplam katı oranının % 8 olduğu koşullarda gaz üretiminin daha fazla olduğunu göstermiştir [14].

Sadaka ve arkadaşları (2000), yapmış oldukları çalışmalarında, 2 adet 4 litrelik fermentlere katı oranı yüksek sığır gübrelerini günde 2 defa 10 tur karıştırma yaparak, karıştırmanın biyogaz üretimine olan etkilerini incelemişlerdir. Karıştırılmış ve karıştırılmamış atıkların uçucu katı madde oranı sırasıyla % 9,6 ve % 7,3, karıştırılmış gübrenin kimyasal oksijen ihtiyacı % 37,9 inmiştir. Karıştırılmış ve karıştırılmamış gübrelerden elde edilen biyogaz miktarları karşılaştırılma yapıldığı zaman, karıştırılmış gübreden % 33,3 daha fazla biyogaz üretilmiştir [15].

Angelidaki ve arkadaşlarının (2005), yılında yapmış oldukları çalışmada, tam ölçekli biyogaz tesisinin verimine reaktör şeklinin ve işletme koşullarının etkisi incelenmiştir. Tesislerin verimliliğine etki eden önemli işletme etkenini bulmak için 18 tam ölçekli merkezi biyogaz tesisi kurulmuştur. Uçucu yağ asitlerinin derişiminin 1,5 g/l nin altında olduğunda çoğu tesisin kararlı olarak çalıştığı görülmüştür. Aşırı yükleme ile uçucu yağ asitlerinin derişiminde artış görülmüştür. Amonyakın kararlılık için önemli bir etken olduğu, biyogaz üretimindeki artış ile yüksek miktarda amonyak arasında bir ilişki olduğu

görülmüştür. Amonyak yaklaşık olarak 4 g N/ l ‘ den büyük olduğunda ayrışma verimliliği düşmüş ve sonuç olarak kalan metan potansiyeli yüksek olmuştur. Kalan metan potansiyeli hidrolik bekleme süresindeki artışla düşmüştür. Sıcaklık 15 °C nin altında olduğunda anaerobik sindirimin çok verimsiz olduğu gözlemlenmiştir [16].

3. TEMEL BİLGİLER

3.1. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, 100 yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, odun, odun atıkları, zirai mahsül ve atık yan ürünleri, kentsel katı atıklar, hayvan atıkları, gıda işleme proseslerinin atıkları, suda yaşayan bitkiler ve algleri kapsar. Biyokütle genelde tükenen fosil yakıt kaynakları yerine kullanılabilecek yenilenebilir enerji için potansiyel kaynak olarak kabul görmüştür. Biyokütle çoğunlukla odun ve odun atıklarından (% 64), kentsel katı atıklardan (% 24), tarımsal atıklardan (% 5) ve atık gazlardan (% 5) üretilir. Birçok biyokütle hemiselüloz, selüloz, lignin ve önemli derecede diğer organiklerden oluşur [17].

Klasik biyokütle enerjisi, ormanlardan elde edilen odun ve yakacak olarak kullanılan bitki ve hayvan atıklarından oluşur. Klasik biyokütle enerjisi, diğer enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde, ilkelden gelişmişe kadar kullanılabilen doğrudan yakma teknikleriyle elde edilen enerjidir. Bu tip biyokütleler genellikle pişirme ve ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Modern biyokütle kaynakları ise, enerji ormancılığı, ağaç ve orman endüstrisi atıkları, hayvansal atıklar ve kentsel atıklardır. Modern biyokütle kaynakları, pazar işlemleri ile karakterize edilmekte, sanayi, ulaştırma ve ticaret sektöründe kullanılmaktadırlar [18].

Biyokütle farklı enerji kaynaklarına şu yöntemler kullanılarak dönüştürülür;

- **Havasız çürütme:** Biyokütlenin mikroorganizmalar yardımıyla oksijensiz ortamda fermentasyona uğrayarak, hemen her yerde kullanılacak bir yakıt ve değerli bir gübre haline dönüştürülmesidir. Bu yöntemle biyokütleden üretilen gaz yakıtlar arasında en iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan biyogazdır. Havasız çürütme yöntemi; çevrim işleminin veriminde kullanılan biyokütle kaynağına, sistem büyüklüğüne, pH değerine ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [19].

▪ **Piroliz:** Biyokütleden oksijensiz ortamda organik molleküllerin parçalanarak gaz elde etme işlemidir. Bu yöntemle katı yakıttan sıvı ve gaz yakıtlar üretilmektedir. Aynı şekilde çöp yığınlarından cam ve metallerin ayrılmasından sonra geriye kalan organik maddelerin hava kullanılmadan yüksek ısı etkisi altında gaz, sıvı, yakıt ve kömüre dönüştürülmesidir [20].

▪ **Karbonlaştırma:** Odun ve maden kömürü gibi organik maddelerin havasız ortamda kimyasal parçalamaya uğramasıdır. Karbonlaştırma işlemi sonucu açığa çıkan gaz bileşenleri ise; yaklaşık olarak % 50 CO₂ (Karbondioksit), % 35 CO (Karbon monoksit), % 10 CH₄ ve % 5 diğer hidrokarbon ve H₂ (Hidrojen)' dir. Odunun karbonlaştırılmasındaki sıvı ürünler ise sulu kısım ve katrandır [19].

▪ **Gazlaştırma:** Karbon içeren biyokütle gibi katıların yüksek sıcaklıkta bozunmasıyla yanabilir gaz elde etme işlemidir. Gazlaştırmada kullanılan biyokütle kaynaklarını üç ayrı sınıfta incelemek mümkündür. Bunlar; mısır sapları, buğday, pirinç, ayçiçeği vb. bitkilerin samanları ile tarım atıkları, ceviz kabuğu, erik, kayısı çekirdekleri vb. gıda işleme sonrası oluşan atıklar ile orman ürünleri atıklarıdır [19].

▪ **Doğrudan Yakma:** Biyokütlenin içindeki yanabilir maddelerin oksijenle hızlı kimyasal tepkime verme işlemi olarak tanımlanır. Mısır, ayçiçeği sapları gibi tarım atıkları içindeki yanabilir maddeler, karbon, hidrojen ve potasyum gibi bazı metalik elementlerdir. Kimyasal tepkime sonucu çevredeki havanın oksijeni tüketilmekte ve ısı ile birlikte ortaya karbondioksit, su buharı ve bazı metal oksitler çıkmaktadır [19].

▪ **Fermantasyon:** Bazı mikroorganizmaların ürettiği enzimlerin etkisiyle organik maddenin üç temel ögesi olan karbonhidratları, proteinleri ve yağları parçalayarak, CO₂, asetik asit ve çözülebilir uçucu organik maddelere dönüştürme işlemidir [21].

Tablo 3.1'de biyokütle kaynaklarından elde edilen yakıtlar, uygulama alanları ve biyokütlenin çevrim yöntemleri verilmiştir

Tablo 3.1. Biyokütle kaynaklarında kullanılan çevrim teknikleri, elde edilen yakıtlar ve uygulama alanları [21].

Biyokütle	Çevrim Yöntemleri	Yakıtlar	Uygulama Alanları
Orman Atıkları	Havasız Çürütme	Biyogaz	Elektrik Üretimi
Tarım Atıkları	Piroliz	Etanol	Isınma
Enerji Bitkileri	Doğrudan Yakma	Hidrojen	Su Isıtma
Hayvansal Atıklar	Fermantasyon	Metan	Otomobiller
Organik Çöpler	Gazlaştırma	Metanol	Uçaklar
Algler	Hidroliz	Sentetik Yağ	Roketler
Enerji Ormanları	Biyofotoliz	Dizel	Ürün Kurutma

Endüstride küçük ve büyük ölçekli biyokütle yanma tesislerinde 100 - 3000 MW (MegaWatt) enerji üretimi yapılmaktadır. Yüksek verimlilik sağladığı için biyokütle ile kömürün birlikte yakıldığı tesisler ise oldukça ilgi çekici uygulamalardır. Biyokütlenin yakılmasıyla güç üretim tesislerinde verim % 20 - 40 arasında değişmektedir. Eğer biyokütle ile kömür birlikte yakılırsa, daha yüksek dönüşüm elde edilmektedir. Biyokütlenin gazlaştırılmasıyla elde edilen düşük kalorifik değerli gaz (4 - 6 MJ (Mega Joule)/m³) gaz motorları ve gaz türbinlerinde yakıt olarak veya kimyasal üretimde (metanol) kullanılabilir. Umut verici diğer bir yöntem entegre gazlaştırma döngüsüdür. Burada gaz türbinleri yüksek verimle gaz yakıttan elektrik enerjisi üretmektedir. Böyle bir tesis yaklaşık % 40 - 50 verimle çalışarak, 30 - 60 MW elektrik üretmektedir. Biyokütleden sentez gazı üretimi gelecekte yakıt olarak kullanılması düşünülen metanol ve hidrojenin üretilmesine yol açmaktadır [22].

Biyokütle günümüzde sanayileşmiş ülkelerde enerji tüketiminin % 3'ünü oluşturmaktadır. Fakat Dünya nüfusunun yaklaşık % 50'sini oluşturan gelişen ülkelerdeki kırsal nüfusun büyük kısmı yakıt için odun şeklinde biyokütleyi esas alır. Biyokütle gelişen ülkelerde birincil enerji tüketiminin % 35'ini oluşturur; Dünyada birincil enerji tüketiminde % 14'e yükselmiştir. Avrupa, Kuzey Amerika ve Orta Doğu'da biyokütle toplam enerji tüketiminin ortalama % 2 - 3'ünü oluşturur. Dünya nüfusunun dörtte üçünü barındıran Afrika, Asya ve Latin Amerika'da biyokütle enerji ihtiyacının önemli bir payını sağlar. Ayrıca gelişen ülkelerdeki kırsal nüfusun büyük bölümü ve şehirsiz nüfusun fakir kısımları için, biyokütle genelde yemek pişirme ve ısınma gibi temel ihtiyaçlar için mevcut ve gücü yetebilen tek enerji kaynağıdır [17].

1980’de % 20 iken 2005’de % 8’e düşmesine karşın, biyokütle Türkiye’nin toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Hububat tozu, saman ve fındikkabuğu gibi tarımsal artıklar, odun ve hayvan dışkı biyokütle enerjisinin temel kaynaklarıdır [23]. Türkiye birincil enerji kaynakları üretimi ve tüketimi Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.2. Türkiye birincil enerji kaynakları üretimi [24].

YILLAR	TAŞKÖMÜRÜ (Bin Ton)	LİNYİT (Bin Ton)	ASFALTİT (Bin Ton)	PETROL (Bin Ton)	DOĞAL GAZ (10 ⁶ m ³)	HİDROLİK ve JEOTERMAL ELEKTRİK (GWh)	JEOTERMAL ISI (Bin Tep)	RÜZGÂR (GWh)	GÜNEŞ (Bin Tep)	ODUN (Bin Ton)	HAYVAN VE BİTKİ ART. (Bin Ton)	BIYOYAKIT (Bin Ton)	TOPLAM (Bin Tep)
1999	1990	65019	29	2940	731	34759	618	6	236	17642	6184		27659
2000	2392	60854	22	2749	639	30955	648	21	262	16938	5981		26047
2001	2494	59572	31	2551	312	24100	687	33	287	16263	5790		24576
2002	2319	51660	5	2442	378	33789	730	62	318	15614	5609		24282
2003	2059	46168	336	2375	561	35419	784	48	350	14991	5439		23783
2004	1946	43709	722	2276	708	46177	811	61	375	14393	5278		24332
2005	2170	57708	888	2281	897	39655	926	58	385	13819	5127		24549
2006	2319	61484	452	2176	907	44338	898	127	403	13411	4984	2	26580
2007	2462	72121	782	2134	893	36007	914	355	420	12932	4850	14	27455
2008	2601	76171	630	2160	1017	33432	1011	847	420	12264	4883	74	29257

Tablo 3.3. Türkiye birincil enerji kaynakları tüketimi [24].

YILLAR	TAŞKÖMÜRÜ (Bin Ton)	LİNYİT (Bin Ton)	ASFALTİT (Bin Ton)	PETROL (Bin Ton)	DOĞAL GAZ (10 ⁶ m ³)	HİDROLİK ve JEOTERMAL ELEKTRİK (GWh)	JEOTERMAL ISI (Bin Tep)	RÜZGÂR (GWh)	GÜNEŞ (Bin Tep)	ODUN (Bin Ton)	HAYVAN VE BİTKİ ART. (Bin Ton)	BIYOYAKIT (Bin Ton)
1999	11362	64049	29	28862	12902	34759	618	6	236	17642	6184	
2000	15525	64384	22	31072	15086	30955	648	21	262	16938	5981	
2001	11176	61010	31	29661	16339	24100	687	33	287	16263	5790	
2002	13830	52039	5	29776	17694	33789	730	62	318	15614	5609	
2003	17535	46051	336	30669	21374	35419	784	48	350	14991	5439	
2004	18904	44823	722	31729	22446	46177	811	61	375	14393	5278	
2005	19421	56571	888	31062	27171	39655	926	58	385	13819	5127	
2006	22798	60184	452	31395	31187	44338	898	127	403	13411	4984	2
2007	25388	72317	782	32143	36682	36007	914	355	420	12932	4850	14
2008	22720	75264	630	30756	36928	33270	1011	847	420	12264	4883	74

Bugün ülkenin bazı köylerinde ısınma ve yemek pişirme amacı ile yukarıda bahsi geçen türde biyokütle yakılmaktadır. Türkiye'nin toplam biyokütle potansiyeline Tablo 3.4'te yer verilmiştir [23].

Tablo 3.4. Türkiye'de biyokütle enerji potansiyeli [23].

	Tarımsal Atık	Hayvansal Atık	Kentsel Atık
Miktar (Mt (Mega Ton) / year)	37 – 48	10,8	21
Alt Isıl Değer (MJ / kg)	17,5	22,7	15
Üretilen Enerji (PJ (Penta Joule).year)	653 – 839	49	315

Yeniden üretilebilen toplam biyoenerji potansiyelinin tarımsal artıklar, canlı hayvan atıkları, orman ve ağaç işleme artıkları ile kentsel atıklardan elde edilecek yeniden üretilebilir enerji potansiyeline dayanmaktadır. Tablo 3.5'te belirtildiği üzere Türkiye'nin toplam biyokütle üretiminin 2020 yılında 7,52 TEP (Ton Eşdeğer Petrol) olması beklenmektedir [25].

Tablo 3.5. Türkiye'de geçmişte, günümüzdeki ve gelecekte planlanan biyokütle enerji üretimi (TEP) [26].

Yıl	Klasik Biyokütle	Modern Biyokütle	TOPLAM
1999	7.012	5	7.017
2000	6.965	17	6.982
2005	6.494	766	7.260
2010	5.754	1.660	7.414
2015	4.790	2.530	7.320
2020	4.000	3.520	7.520
2025	3.345	4.465	7.810
2030	3.310	4.895	8.205
TOPLAM	34.658	17.853	52.511

3.2. Anaerobik Fermentasyon ve Biyogaz Üretimi

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, nitratin yüzey ve yeraltı sularına karışması ile ötrofikasyona, sebze-meyve tüketimi ve içme suyu yoluyla da insan ve diğer canlı yaşamını tehdit etmesine neden olmaktadır [27]. Organik atıkların gideriminde en etkili ve aynı zamanda enerji sağlayan yöntemlerden biri anaerobik fermentasyon (havasız çürütme) yöntemidir [28,29].

Anaerobik fermentasyon, organik malzemelerin oksijensiz ortamda yaşayan bakteriler tarafından bozunmasıdır. Bu bozunma sonucunda organik gübre ve biyogaz açığa çıkmaktadır. Aerobik fermentasyonda ise oksijen bulunan ortamda yaşayan bakteriler organik malzemenin bozunmasını sağlarlar. Bu bozunma sonucunda ise başlıca karbondioksit ve kompost gübre elde edilir. Anaerobik fermentasyonda, aerobik fermentasyonun tersine, organik maddelerin mineralizasyonu çok az yeni bakteri hücresi üretimiyle mümkün olmaktadır [30]. Aerobik sistemlerde yer ihtiyacı anaerobiklere göre beş kat daha fazladır [31]. Endüstriyel tesislerin arıtma sistemlerinde, bütün avantajlarına rağmen anaerobik fermentasyonun daha az tercih edilmesi, bu sistemlerin belli şartlar altında düzensizleşebilmesi ve inhibe olabilmesinden kaynaklanmaktadır [32].

3.2.1. Anaerobik Arıtımın Temelleri

3.2.1.1. Mikrobiyoloji

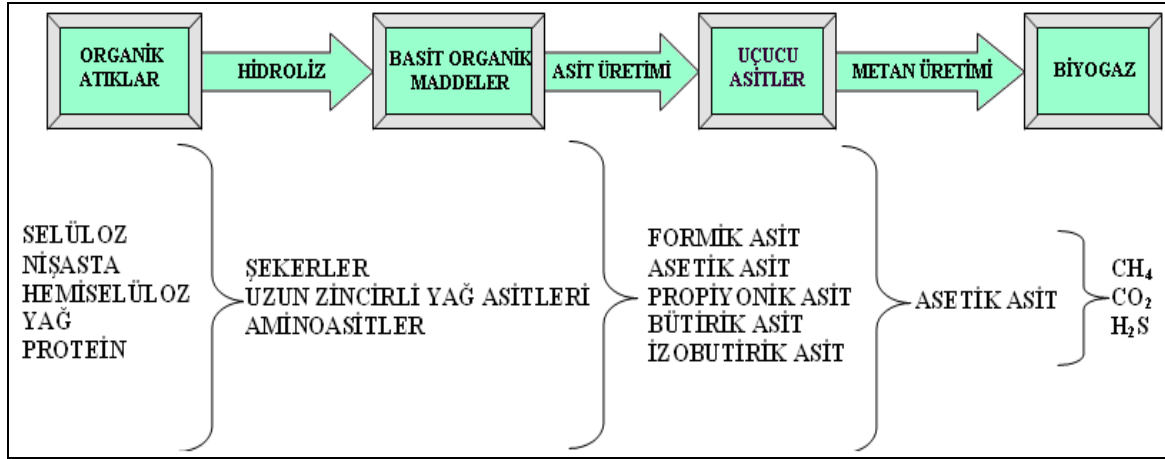
Anaerobik arıtma asit bakterileri ve metan bakterileri başta olmak üzere değişik mikroorganizma gruplarının rol aldığı oldukça karmaşık bir biyokimyasal süreçtir. Asit bakterileri ve metan bakterileri de kendi arasında her biri ikişer alt gruba ayrılmaktadır [33]. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları Tablo 3.6'da görülmektedir.

Tablo 3.6. Başlıca anaerobik mikroorganizma grupları [33].

Asetik Asit Üretenler	Bütirik ve Propiyonik Asit Üretenler Asetik Asit Üretenler
Metan Bakterileri	Asetik Asit Kullananlar Hidrojen Kullananlar

Organik atıkların anaerobik ayrışması en genel halde Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, üç basamaklı bir süreç şeklinde ele alınabilir.

- Mikroorganizmalar tarafından üretilen hücre dışı enzimlerin organik bileşikleri basit çözülebilir bileşiklere ayrıştırdığı hidroliz basamağı,
- Asit oluşturan bakterilerin basit organik bileşikleri uçucu asitlere dönüştürdüğü asit üretim basamağı,
- Asetik asit kullanan metan bakterilerinin asetik asiti parçalayarak, hidrojen kullanan metan bakterilerinin hidrojen ve karbondioksiti kullanarak metan ürettikleri metan üretimi safhası [34].



Şekil 3.1. Anaerobik ayrışma basamaklarının genel gösterimi [34].

3.2.1.2. Anaerobik Artımın Biyokimyası

Anaerobik reaktörlerde arıtılan organik atıkların içeriğindeki başlıca organik maddeler polisakkaritler, lignin, proteinler, azotlu bileşikler ve yağlardır. Bu maddelerin yapı ve işlevlerinin ana hatlarıyla da olsa bilinmesi anaerobik arıtmada oluşan biyokimyasal olayların daha iyi anlaşılmasında yarar sağlar [33].

▪ **Polisakkaritler:** Polisakkaritler selüloz, hemiselüloz ve pektinleri içermektedirler. Saf selüloz tıpkı nişasta gibi glikozun bir polimeridir. Fakat kolay hidrolize olamaz. Hemiselüloz ve pektinler, selülozun aksine belirsiz yapıdaki maddelerin heterojen karışımlarıdır ve çeşitli çözücülerdeki çözünürlükleri ile belirlenirler. Polisakkaritler genel olarak havasız ortamda ayrıştırılabilmektedir. Polisakkaritlerin hidroliz yolu ile monosakkaritlere parçalanması sırasında şekerler enerji kaynağı olarak kullanılır. Glikozun polimerleri olarak ele alındığı takdirde polisakkaritlerin hidroliz yolu ile tam anaerobik fermentasyonu; $(C_6H_{10}O_5)_n + (n-1)H_2O \rightarrow 3nCH_4 + 3nCO_2$ tepkimesi ile verilir. Bu denklemden hareketle, genel formülü $C_nH_{2n}O_n$ olan bir karbonhidratın polimerleri için gaz verimi hesaplandığında, standart koşullarda giderilen uçucu katı maddenin kilogramı başına $0,75 \text{ m}^3$ gaz üretebileceği görülmektedir [33].

▪ **Lignin:** Lignin aynı tip monomerlerin ardışık bağlanmış şekli olmayıp, farklı tipteki monomerlerden oluşur. Bu yüzden ligninin yapısı henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Lignini oluşturan monomerler en az beş farklı tarzda bir araya gelebilmekte ve bunlardan hiçbirisi de anaerobik olarak kolayca hidroliz olmamaktadır [33].

▪ **Proteinler:** Proteinler yirmi kadar doğal aminoasidin polimerleridir. Havasız fermentasyon öncesinde proteinlerin bünyesindeki azot; amonyak, asetat, propiyonat ve bütirat gibi belli başlı fermentasyon ürünlerine çevrilerek uzaklaştırılır. Havasız reaktörlerde proteinlerin mikroorganizmalarca gazlara ve amonyağa dönüştürülmesi süreci; $2C_5H_7NO_2 + 6H_2O \rightarrow 5CH_4 + 5CO_2 + 2NH_3$ tepkimesiyle ifade edilir.

▪ **Azotlu Bileşikler:** Bilinen en önemli azotlu bileşik, hayvansal bir organik atık olan üre; $CO(NH_2)_2$ dir. Üre anaerobik bakterilerce amonyak ve CO_2 e parçalanır. $CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + 2NH_3$

Üre, suda çözüldüğü için, havasız reaktörlerin çıkış sularında önemli oranda azot bulunabilir. Kuş gübrelerindeki ürik asit de aynı şekilde suda iyi çözünen bir bileşiktir. Ürik asidin deaminasyonu sırasındaki NH_3 (Amonyak) kaybı ile çiftlik gübrelerinde önemli oranda azot giderimi olmaktadır. Buna rağmen özellikle tavuk gübrelerinin çürütüldüğü tesislerde, arıtılmış çamurdaki NH_3 derişimi yüksek değerler almaktadır.

Azotlu bileşiklerin fermentasyonu sonunda formik, asetik, propiyonik ve laktik asit gibi yağ asitleri ile CO₂ ve H₂ gazları oluşmaktadır [33].

- **Yağlar (Lipidler):** Yağlar suda çözünmeyen ancak, organik çözücülerde çözünebilen heterojen organik bileşiklerdir. Lanolin ve benzeri bazı yağ türleri havasız ayrışma süreci ile parçalanamamaktadır. Yağ asitlerinin genel formülleri CH₃(CH₂)_nCOOH (Karboksilik Asit) olup asidin COOH kökünden asetil grupları ardışık olarak koparılabilir ve asetik asit ve H₂'ne dönüştürülür [33].

3.3. Biyogaz

İsminden de anlaşılacağı üzere, “biyogaz” biyolojik bir prosesle oluşmaktadır. Oksijensiz bırakılmak (anaerob olarak adlandırılır) suretiyle organik kütleden biyogaz adı verilen bir gaz karışımı ortaya çıkar. Doğada yaygın olarak görülen bu proses örneğin bataklıklarda, deniz tabanlarında, sıvı gübre çukurlarında ve geniş getiren hayvanların işkembelerinde de gerçekleşir. Bu esnada organik kütle bir dizi mikroorganizma tarafından neredeyse tümüyle biyogaza dönüştürülür. Bunun yanı sıra belirli miktarlarda enerji (ısı) ve yeni biyokütle oluşur. Biyogaz metandan (% 50 - 75 Hac.) ve karbondioksitten (% 25 - 50 Hac.) oluşmaktadır. Bunun yanında biyogazda düşük miktarlarda hidrojen, hidrojen sülfür, amonyak ve eser miktarda diğer gazlar da bulunur. Bileşim asıl olarak kullanılan materyaller, fermentasyon işlemi ve farklı teknik uygulamalarla belirlenebilir [35-38].

3.3.1. Biyogazın Oluşum Aşamaları

Biyogazın oluşum prosesi çok sayıda aşamada gerçekleşmektedir. Bu esnada prosesin bütününe bir olumsuzluğa meydan vermeyecek şekilde gelişmesi için tek tek bozunma aşamalarının birbirleri ile çok uyumlu olması gerekir [39].

Biyogaz üretimi, farklı mikroorganizma gruplarının rol aldığı oldukça karmaşık bir biyokimyasal prostestir. Oksijene karşı hassas olan ve oksijen varlığında tamamen inhibe olan bu bakteri grubu, organik maddeleri biyolojik yollarla CH₄ ve CO₂'ye dönüştürür.

Metan fermentasyonu olarak da adlandırılan bu reaksiyonlar zinciri, aşağıda belirtilen 4 aşamadan oluşur [39,40].

- Büyük moleküllü organik maddelerin, daha küçük moleküllü organik maddelere dönüşümü hidroliz aşamasında gerçekleşir [41]. İlk aşama olan “hidroliz” esnasında hammaddenin kompleks yapıları (örneğin karbonhidratlar, albüminler, yağlar) daha basit organik yapılara (örneğin aminoasitler, şeker, yağ asitleri) dönüştürülür. Buna katılan hidrolitik bakteriler, malzemeyi biyokimyasal olarak parçalayan enzimleri serbest bırakırlar [39].

- Küçük moleküllü organik maddelerin asit bakterileri tarafından uçucu yağ asitlerine dönüşümü, asit oluşumu asidojeniz aşamasında gerçekleşir.

- Uçucu yağ asitlerinin asetik asit, hidrojen ve karbondioksit dönüşümü, asit oluşumu asetojeniz aşamasında gerçekleşir [41]. Oluşan ara ürünler “asetojenez aşaması”nda fermente edici (asit oluşturan) bakteriler tarafından düşük yağ asitlerine (asetik, propiyon ve bütirik asit), karbondioksit ve hidrojene ayrıştırılır. Bu esnada aynı zamanda düşük miktarlarda laktik asit ve alkoller de oluşur. Bu aşamada oluşan ürünün türü, oluşan hidrojenin yoğunluğu tarafından belirlenir [39]. Asetojenez, yani “asit oluşumu” aşamasında bu ürünler asetojen bakteriler tarafından biyogazın öncül maddelerine (asetik asit, hidrojen ve karbondioksit) dönüştürülür. Bu bağlamda kısmi hidrojen basıncı büyük önem taşımaktadır. Fazla yüksek hidrojen miktarı enerjisel nedenlerle asetojeniz ara ürünlerinin bozunmasını engeller. Bunun sonucu olarak propiyon asidi, izobütirik asit, izovaleriyon asidi ve kapron asidi gibi organik asitler zenginleşir ve metan oluşumunu engellerler. Asetojen bakteriler (hidrojen oluşturu) bu nedenle hidrojeni karbondioksitle birlikte metan gazı oluşturmakta kullanan (türler arası hidrojen transferi) ve bu sayede asetik asit oluşturan bakteriler için kabul edilebilir çevre koşulları oluşturan ve hidrojen tüketen metanojenik arkeler ile sıkı bir yaşam ortaklığı kurmak zorundadırlar [42].

- H_2 , asetat ve CO_2 ’nin metan bakterileri tarafından metana dönüşümü, metan oluşumu metanojeniz aşamasında oluşur [41]. Biyogaz oluşumunun son aşaması olan metanojeniz de öncelikle asetik asitler, hidrojen ve karbondioksit, mutlak anaerobik

metanojen arkeler tarafından metana dönüştürülür. Hidrojen kullanan metanojenler hidrojen ve karbondioksitten metan üretirken, asetoklastik metan oluşturucular asetik asidi ayrıştırarak metan oluştururlar. Tarımsal biyogaz tesislerinde hüküm süren koşullar altında metan oluşumu yüksek ortam basıncında ağırlıklı olarak hidrojen sentezi reaksiyonuyla, nispeten daha düşük ortam basıncında ise asetik asidin parçalanması reaksiyonuyla gerçekleşir. Metanın % 70 oranında asetik asidin parçalanması, % 30 oranında da hidrojenin sentezi sonucu oluştuğuna dair atık su çamuru fermantasyonundan elde edilen bilgi, tarımsal biyogaz tesislerinde her halükarda çok kısa bekleme süresine sahip yüksek basınç fermentörleri için geçerlidir [43,44]. Yapılan yeni araştırmalar, türler arası hidrojen transferinin hız belirleyici aşama olacağını ortaya koymaktadır [45].

Oksijensiz bozunmanın dört aşaması aslında tek basamaklı bir proseste paralel olarak aynı zamanda gerçekleşir. Ancak her bozunma aşamasının bakterileri farklı yaşam alanı taleplerine sahip oldukları için (örneğin pH değeri, ısı) proses tekniği bakımından bir uzlaşmanın oluşturulması gerekir. Metanojenez mikroorganizmalar düşük büyüme hızları nedeniyle biyogenezin en zayıf halkası olduklarından ve rahatsız edici etkilere karşı çok hassas tepki vermelerinden ötürü, çevre koşullarının metan oluşturan bakterilerin taleplerine uydurulması gerekmektedir. Hidrolizi ve asit oluşumunu metan oluşumundan iki ayrı proses aşaması ile ortamsal olarak ayırma girişimi (iki aşamalı proses uygulaması) pratikte sınırlı şekilde gerçekleşmektedir, çünkü hidroliz aşamasında düşük bir pH değerine ($\text{pH} < 6.5$) rağmen yine de kısmen metan oluşumu gerçekleşmektedir. Oluşan hidroliz gazı karbondioksit ve hidrojenin yanı sıra metan da içerir, bundan ötürü çevre üzerindeki olumsuz etkilerden ve güvenlik risklerinden kaçınmak için hidroliz gazının bir değerlendirmeye veya işleme tabi tutulması gerekir [46].

Biyogaz tesisinin konstrüksiyonuna ve işletme tarzına, ayrıca materyal olarak kullanılan hammaddenin özelliklerine ve konsantrasyonuna bağlı olarak, çok aşamalı proseslerde her bir fermentör basamağında farklı çevre koşulları oluşturulabilir. Çevre koşulları da mikrobiyolojik biyogenezin bileşimini ve aktivitelerini etkiler ve böylelikle oluşan metabolizma ürünlerine doğrudan etki ederler [39].

3.3.1.1. Hidroliz

Hidroliz aşamasında karmaşık yapılı 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. 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. 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 [47]. Hidroliz oranı; pH, sıcaklık, kullanılan atığın yapısı ve partikül büyüklüğü gibi faktörlerin bir fonksiyonudur [48].

3.3.1.2. Asidojenesis

Hidroliz aşamasında oluşan çözünmüş bileşikler, asidojen bakterileri tarafından kısa zincirli organik yağ asitlerine dönüştürülür. Bu aşamada çözünmüş karbonhidratlar etanol, H₂ ve CO₂'e; aminoasitler süksinik asit ve H₂'ye; yağ asitleri ise asetat ve H₂'ye indirgenir. Hızla gelişen hidrojen iyonlarının konsantrasyonu, fermentasyon 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 [47].

3.3.1.3. Asetojenesis

Asetojenesiste, asidojenik fazda oluşan ürünler, asetojenik faz bakterilerince substrat olarak kullanılır. Asetojenik bakteriler oglikatör H₂ üreticileridir. Yaşamaları ve büyümeleri için gerekli olan enerjiyi, çok düşük H₂ konsantrasyonlarında alırlar [47]. Bu fazda, asidojenesiste oluşan asetik asit dışındaki diğer uçucu yağ asitleri asetik asit,

hidrojen ve karbondioksit'e dönüştürülür [27]. Asit üretiminin temsili reaksiyonu; $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$ şeklindedir [49].

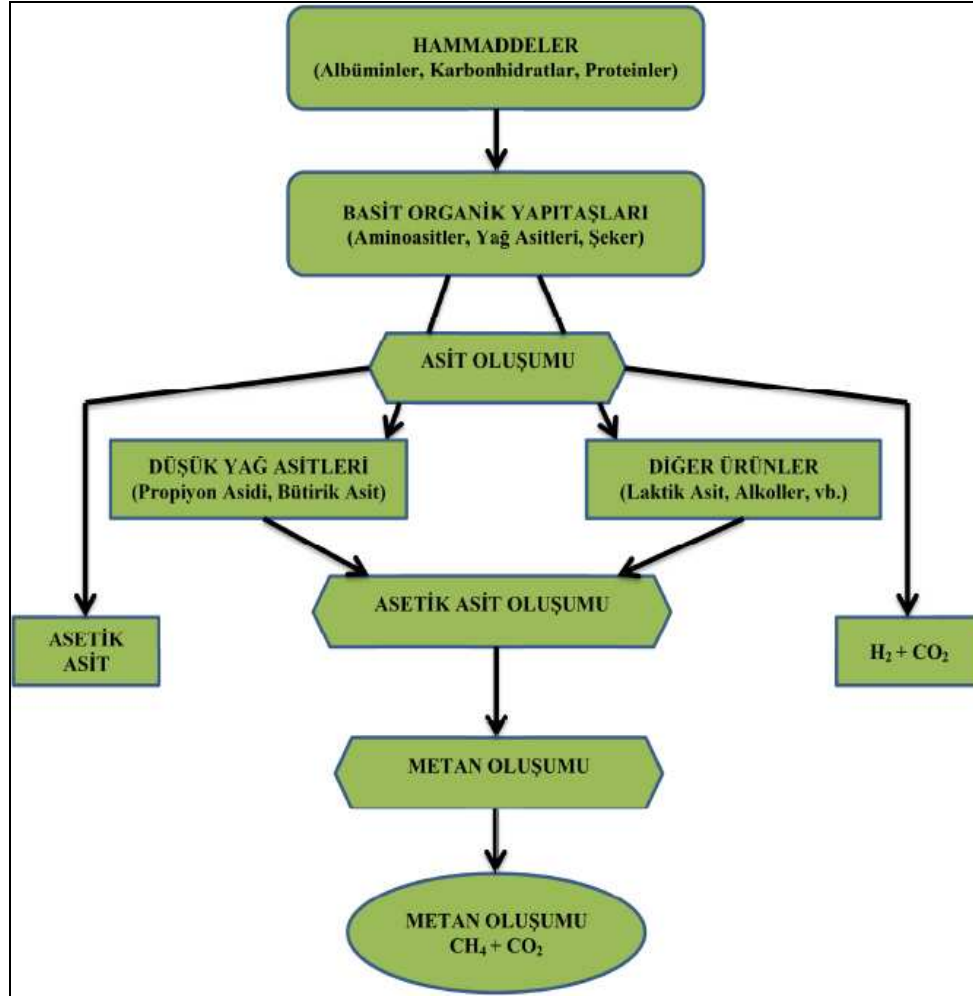
Asetojenik faz, final aşamasında indirgenme oranını limitler. Bu bakterilerin aktivasyonu, biyogazın kalite ve içeriğini etkiler. Asidojenik ve asetojenik faz, genel olarak birlikte asit üretim fazı olarak değerlendirilir [47]. Her iki fazın genelinde çözünür hale dönüşmüş organik maddeler bakterilerce asetik asit başta olmak üzere uçucu yağ asitleri, H_2 ve CO_2 gibi daha küçük yapıları maddelere dönüştürülür. Bu bakteriler anaerobiktir. Asidik şartlarda büyürler. Büyümeleri ve çoğalmaları için ihtiyaç duydukları oksijeni çözeltideki bağlı halde bulunan oksijenden sağlarlar. Asit oluşturan bakteriler metan oluşturan 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 [47].

3.3.1.4. Metanojenezis

Metan fermentasyonu yüksek anaerobik şartlar altında gerçekleşir. Metanojenezis aşamasında, asetojenezis aşamasında oluşan organik asitler, H_2 ve asetat; asetik asitin parçalanması ve/veya hidrojen ile karbondioksitin sentezlenmesi ile metanojen mikroorganizmalar tarafından CH_4 ve CO_2 'e dönüştürülmekte ve böylece biyogaz üretilmektedir. Üretilen metanın yaklaşık %30'u hidrojen gazı ile karbondioksit gazından, %70'i ise asetik asitin parçalanmasından oluşur. Tüm uçucu organik asitler ve çözünen organik bileşikler biyogaza dönüşmez. Bazı organik maddeler arıtılmadan deşarj olur [47]. Metan üretiminin temsili reaksiyonu asetik asitin parçalanması sonucu $CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO$ ve hidrojen ile karbondioksitin sentezlenmesi sonucu $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ metan üretimi gerçekleşir [49,50].

Metan üretim süreci yavaştır. Anaerobik arıtmada hız sınırlayıcı safha olarak kabul edilmektedir. Metan oluşturan bakteriler, asidojenik ve asetojenik bakterilerin aksine çevresel şartlara karşı çok hassastırlar. Metan oluşumunun zarar görmesi, sistemde aşırı asit oluşumuna neden olabilir [41].

Şekil 3.2’de anaerobik bozunma sonucu biyogazın oluşumu şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.2. Anaerobik bozunmanın şematik tanımı [39].

3.3.2 Anaerobik Bozunma Sonucu Elde Edilen Gaz Kalitesi

Biyogaz, ağırlıklı olarak metan (CH_4) ve karbondioksitten (CO_2), ayrıca su buharından ve eser miktarda diğer gazlardan oluşan bir gaz karışımıdır. Burada ilk etapta metan oranı önem taşımaktadır, çünkü metan biyogazın yanıcı kısmını teşkil etmekte ve böylece ısıl değerini doğrudan etkilemektedir. Biyogazın bileşimine hedefe yönelik proses kontrolüyle sadece sınırlı ölçüde tesir edilebilir. Biyogaz bileşimi ilk etapta girdi malzemesinin bileşimine bağlıdır. Bunun ötesinde metan oranı fermentasyon ısısı, reaktörün yükleme oranı ve hidrolik bekleme süresi gibi proses parametrelerinin yanı sıra,

proseslerde yaşanan duraklamalardan ve biyolojik desülfürizasyon işleminden de etkilenir. Hedeflenebilir metan verimi ise asıl olarak kullanılan materyallerin bileşimi, yani yağ, protein ve karbonhidrat oranları tarafından belirlenir. Gaz karışımının kalitesi bakımından eser gaz hidrojen sülfür (H_2S) konsantrasyonu önemli bir rol oynar. Hidrojen sülfür çok düşük konsantrasyonlarda bile bozunma süreci üzerinde engelleyici bir etki oluşturabildiği için, fazla yüksek olmamalıdır. Öte yandan biyogazdaki yüksek H_2S konsantrasyonları kullanım esnasında kombine ısı ve enerji santrallerinde ve ısı kazanlarında korozyon hasarlarına neden olur [39]. Anaerobik fermantasyon sonucu elde edilen biyogazın ortalama bileşimine dair genel bilgi Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7. Anaerobik bozunma sonucu elde edilen biyogaz bileşimi [35].

BİLEŞEN	KONSANTRASYON
Metan (CH_4)	50 – 75 Hac. - %
Karbondioksit (CO_2)	25 – 45 Hac. - %
Su (H_2O)	2 – 7 Hac. - % (20 – 40 $^{\circ}C$)
Hidrojen Sülfür (H_2S)	20 – 20.000 ppm
Azot (N_2)	< 2 Hac. - %
Oksijen (O_2)	< 2 Hac. - %
Hidrojen (H_2)	< 1 Hac. - %

3.4. Biyogaz Üretiminde Kullanılan Anaerobik Reaktörler

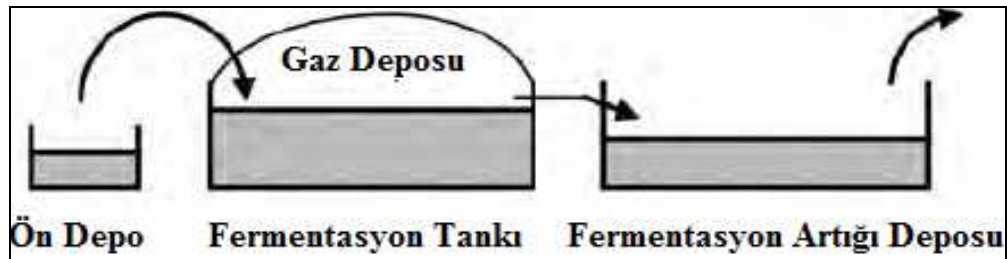
Biyogaz üretiminde kullanılan sistemler, tesisin kurulacağı bölgenin yerel şartlarına, atık envanterine ve istenen kapasiteye göre farklılık gösterir. Biyogaz sistemleri seçilirken göz önünde bulundurulması gereken değişmez özellikler şöyle sıralanabilir [47,48].

- 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 fermente atıkların depolanabilecek miktarları göz önünde bulundurulmalıdır.
- Seçilen tesis teknolojisi teknik olarak bölgeye uyumlu olmalıdır [47,48].

Anaerobik fermantasyon ile biyogaz üretimi için reaktörler genellikle besleme şekline göre kesikli beslemeli tip ve sürekli beslemeli tip olarak ikiye ayrılırlar. Sürekli beslemeli tip reaktörler; Sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler ve sürekli beslemeli iki aşamalı sistemler olarak imal edilirler.

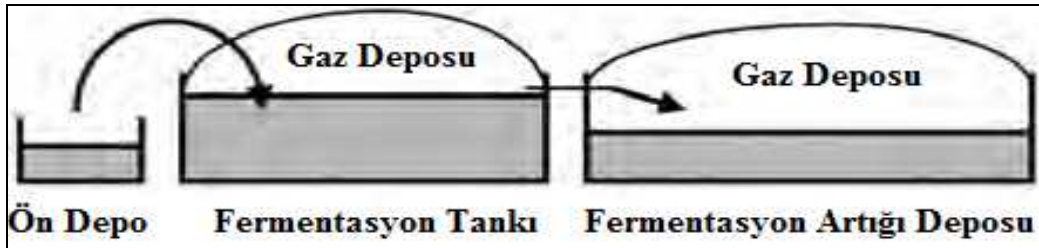
Kesikli beslemeli tip reaktörlerde, besleme materyali reaktöre bir kere doldurulur ve gaz çıkışı bitene ya da azalana kadar beklenir. Daha sonra boşaltılarak tekrar yeni materyal eklenir. Bu tip reaktörler, besleme materyalinin yeterli miktarda bulunmadığı ya da dönemsel olarak bulunabildiği yerlerde veya besleme materyalinin iri taneli bir yapıya sahip olduğu yerlerde avantajlı olmaktadır. Ayrıca besleme ve boşaltma sırasındaki çalışmaları göz ardı edilirse, kesikli beslemeli tip reaktörlerin günlük bakımı oldukça kolaydır. Fakat biyogaz üretimi düzensizdir. Bu sorun farklı zamanlarda doldurulan birkaç kesikli reaktörün gaz çıkışlarının birleştirilerek gaz depolama tankına verilmesiyle çözülebilir. Fakat bu çözüm ilk yatırım maliyetini artırmaktadır [51].

Sürekli beslemeli sistemlerin materyal ihtiyacı bir stoklama tankından veya hazırlama tankından günde birkaç kere fermentöre pompalanır. Fermentöre aktarılan taze materyal miktarı ile aynı miktarda materyal fermantasyon atığı deposuna aktarılır. Bu aktarma işlemi ya yeni yüklenen materyalin basınç etkisiyle gerçekleşir, ya da bir düzenek aracılığı ile fermentörden alınır. Bu yöntem dengeli bir gaz üretimini ve fermentörden optimum faydalanmayı sağlar. Ancak yine de fermentörde bypass akımı, yani yeni ilave edilen materyalin derhal yeniden tankı terk etme tehlikesi söz konusudur [52]. Bunun yanı sıra açık fermantasyon artığı depolarında metan gazı emisyonu oluşmaktadır [39]. Şekil 3.3'te üst kısmı kapalı olmayan fermantasyon artığı deposuna sahip sürekli beslemeli bir sistemin akış yöntemi şeması görülmektedir.



Şekil 3.3. Fermentasyon artığı deposu açık sürekli beslemeli sistemin akış yöntemi şeması [39].

Ayrıca sürekli beslemeli sistemlerin fermentasyon artığı deposunun üst kısmı kapalı olan sistemlerde bulunmaktadır. Bu sistemler depolamalı - akışlı yöntem olarak isimlendirilir, sürekli yüklemeli sistemin bir değişik şeklidir. Bu yöntemde çalışan biyogaz tesislerinde fermentasyon artığı deposunun üzeri örtülüdür. Bu şekilde ortaya çıkan biyogaz tutulmakta ve değerlendirilmektedir. Yani fermentasyon artığı deposu bir tür “depolama tesisi” görevi görmektedir. Bu depolama tesisi kısmının önünde bir akış fermentörü devreye sokulmuştur. Örneğin gübre olarak kullanılmak üzere çok miktarda fermente olmuş materyale ihtiyaç duyuluyorsa, bu durumda akış fermentöründen de materyal alınabilir. Şekil 3.4’te işlem şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntem düzenli bir gaz üretimi sağlamaktadır. Bekleme süresi tam olarak saptanamayabilir, çünkü akış fermentöründe bypas akımları söz konusu olabilir [52]. Bu yöntem teknolojinin son durumuna uygundur. Fermentasyon artığı deposunun üzerinin örtülmesiyle oluşabilecek yatırım maliyeti, elde edilen ilave gaz miktarıyla kesin olarak karşılanır [39].

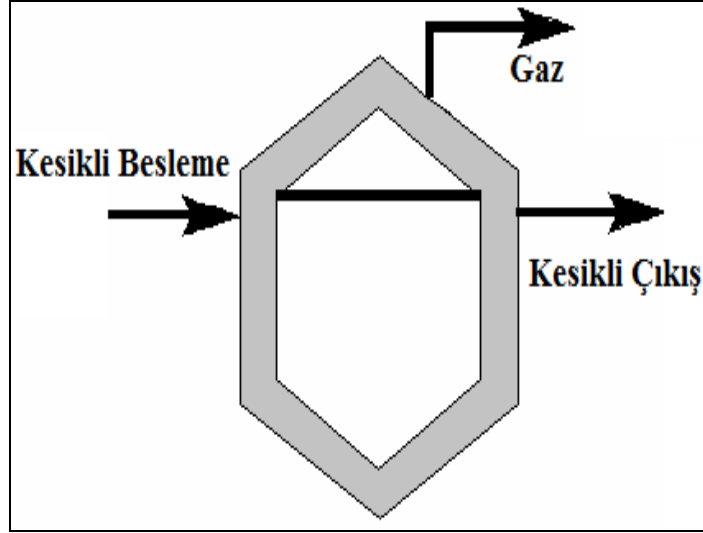


Şekil 3.4. Fermentasyon artığı deposu kapalı sürekli beslemeli sistemin akış yöntemi şeması [39].

3.4.1. Kesik besleme (Batch –Beklemeli Sistem)

Kesik beslemede fermentör tümüyle taze materyalle doldurulur ve ağzı hava almayacak şekilde kapatılır. Materyal belirlenen bekleme süresinin sonuna kadar tankta kalır, bu esnada materyal eklenmesine veya alınmasına gerek yoktur. Bekleme süresinin bitimiyle birlikte fermentör boşaltılır ve taze materyalle yeniden doldurulur, bu esnada bozunmuş materyalin küçük bir kısmı yeni ilave edilen materyalin aşılınması için tankta bırakılabilir. Kesik besleme kabının hızlı bir şekilde doldurulması ve boşaltılması için, ilave taze materyal ve depolama tanklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Beklemeli sistemde gaz üretim miktarı zamana bağlı olarak değişmektedir. Örneğin gaz üretimi dolumdan sonra yavaşça artar, materyale göre birkaç gün zarfında azami seviyeye ulaşır, sonra da sürekli olarak düşer. Bundan ötürü tek bir fermentörde sabit bir gaz üretimi ve kalitesi söz konusu

değildir, aksine birden fazla fermentörün değişik zamanlarda doldurulmasıyla (dönüşümlü tank yöntemi) dengelenmelidir. Bu sayede asgari bekleme süresine tam olarak uyulabilir [52]. Şekil 3.5'te kesik besleme ile materyal ihtiyacı karşılanan bir reaktör görülmektedir.



Şekil 3.5. Kesik beslemeli reaktör

Kesikli reaktörlerin kullanımı 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 [48,53]. Sistem çalışması sırasında oluşan koku sorunu ve döngünün boşaltılmasında yaşanan sıkıntılar, kesikli sistemlerin kullanımını sınırlandırmaktadır [54].

3.4.2. 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 [48].

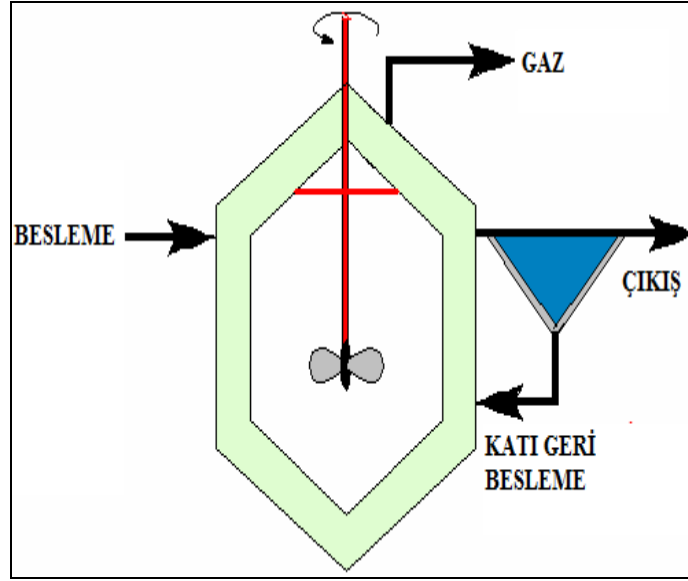
Özellikle iki aşamalı sistemlere göre basit tasarımları ve düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle tercih edilirler. Pek çok organik atık için reaktör tasarımı doğru yapıldığında ve işletme şartları dikkatli seçildiğinde, biyolojik performansları iki ve çok aşamalı sistemlerle aynı düzeydedir. Bu sistemlerde katı atıkların fermentasyonunda atığın kolay bozunabilir olması fermentörde tutulamama sorununu meydana getirebilir [55].

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'nın düşmesine, fazla miktarda uçucu yağ asitlerinin oluşumuna ve metanojenesis aşamasının inhibe olmasına neden olabilir [47].

Tek aşamalı sistemlerde fermentasyon uygulaması ıslak ve kuru olarak gerçekleştirilebilir. İki teknolojiyi birbirinden ayıran özellik, kullanılan atıkların nem içeriğidir [55]. Atıkların nem içeriğine bağlı olarak seçilen teknolojiye göre, farklı nakliye, karıştırma ve ön arıtma işlemleri gerekebilir [41].

Islak fermentasyonda 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. Kuru fermentasyonda 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 [55].

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. Anaerobik fermentasyonda, Avrupa'daki büyük ölçekli tesislerin % 90'ında sürekli beslemeli tek aşamalı sistemler kullanılmaktadır [55]. Şekil 3.6'da sürekli beslemeli tek aşamalı bir reaktör görülmektedir.



Şekil 3.6. Sürekli beslemeli tek aşamalı bir reaktör

3.4.3. Sürekli Beslemeli İki Aşamalı Sistemler

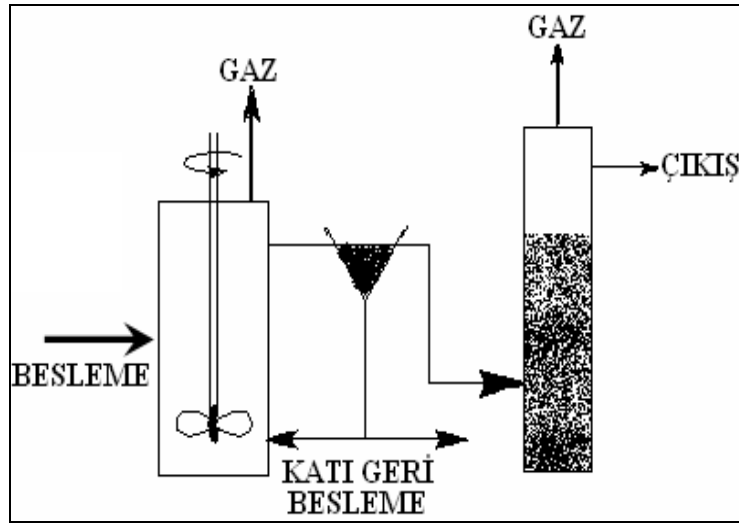
İki aşamalı sistemlerde asit ve metan oluşumu ayrı reaktörlerde gerçekleşir. Katı faz reaktörü olarak da anılan asit fazı reaktörü ilk reaktör olup, bu reaktörde hidroliz ve asidojenesis aşamaları gerçekleşirken, metan fazı reaktörü olarak anılan ikinci reaktörde metanojenesis aşaması gerçekleşir [27].

İki fazlı reaktörlerde asidifikasyon aşamasının gerçekleştirildiği evrede, H_2 'nin yanı sıra CO_2 ve asetik asit üretilmektedir. Buradan alınan materyal metanlaştırma reaktörüne gönderilmektedir. Karbonhidratlarca zengin olan materyallerin kullanımı durumunda, elde edilen H_2 sistem verimini yükseltmektedir [56]. Fakat bu tip reaktörler de küçük ölçekli kırsal kesim uygulamalarında ekonomik değildir [57].

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 [55].

Yapılan çalışmalarda faz ayrımı tasarlanan projelerde, bozunma oranı ve biyogaz üretiminde daha yüksek verim elde edildiği gözlenmiştir [48].

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 [27]. Ayrıca iki aşamalı sistemlerde organik yükleme ilk reaktöre yapıldığından, metan üretiminin gerçekleştiği ikinci reaktöre daha sabit yükleme gerçekleşir [53]. Özellikle kolay kontrol edilebilmeleri ve fermentasyon 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. Tasarımlarının daha karmaşık olması, yüksek yatırım maliyetleri ve metan üretiminde oluşabilecek sorunlardan dolayı daha az biyogaz eldesi riski, iki aşamalı sistemler için kısıtlayıcı unsurlardır [58]. Şekil 3.7’de sürekli beslemeli iki aşamalı bir reaktör görülmektedir.



Şekil 3.7. Sürekli beslemeli iki aşamalı bir reaktör

3.5. Biyogaz Üretimini Etkileyen Faktörler

Biyogazın kimyasal oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Tüm biyolojik proseslerde olduğu gibi, anaerobik fermentasyonda da çevresel şartlar metan oluşumuna etki eder. Bu şartlar sıcaklık ve karıştırma, yükleme oranı, bekletme süresi gibi fiziksel, C/N (Karbon Azot Oranı), pH, alkalinite, toksik maddeler, besi ortamı gibi kimyasal şartlardır [59]. Tesis tasarımı ve işletiminde bu parametrelerin göz önünde

bulundurulması gerekir. Anaerobik fermentasyonun gerçekleşmesi için gerekli optimum çevresel koşullar Tablo 3.8’de özetlenmiştir.

Tablo 3.8. Anaerobik fermentasyon çevresel gereklilikleri [47].

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	< -250 mV
Gerekli C:N:P:S Oranı	500:15:5:3	600:15:5:3
İz Elementler	Özel İhtiyaç Yoktur	Gerekli: Ni, Co, Mo, Se

En uygun fermentasyon prosesi için pek çok parametre göz önünde bulundurulur ve kontrol edilir. Biyogaz üretimini etkileyen temel sistem parametreleri;

- Sıcaklık,
- Hidrolik bekleme süresi,
- Organik yükleme hızı,
- pH,
- C/N oranı,
- Mikroorganizma konsantrasyonu,
- Karıştırma,
- İnhibitörler [47,60].

3.5.1. Sıcaklık

Biyokimyasal reaksiyonlar, mikroorganizmaların büyümesi ve gaz üretimi açısından sıcaklığa karşı hassastır ve genel olarak sıcaklık artışı ile artar [47]. Anaerobik fermentasyon 3 °C ile 70 °C sıcaklık aralığında gerçekleşebilmektedir [61]. Sıcak su kaynaklarında 85 °C’de yaşayabilen metan bakterileri tespit edilmiştir [59]. Bu sınır bazı çalışmalarda 0-100 °C olarak verilmektedir [62,63]. Sıcaklık azalışı metan oluşum hızına, asitleşme evresinin hızına kıyasla daha çok etki eder. Sıcaklığın artışıyla fermentasyon süresi kısalır [64]. Anaerobik fermentasyonda bekletme süresine, atık su ve atık

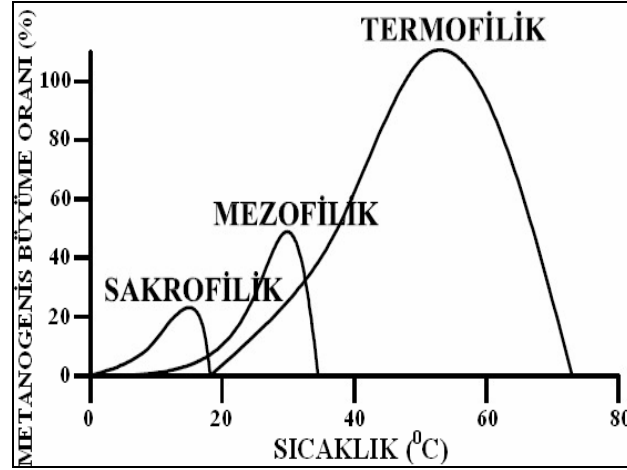
maddelerin türüne, pH ile içerdikleri iyonlara ve bunlara bağımlı olarak oluşan mikroorganizmalar topluluğunun yapısına göre 3 değişik sıcaklık bölgesi vardır;

- **Psikofilik (Sakrofilik) Fermentasyon (3 - 20 °C):** Bu sistemlerde çürütme hızı çok yavaş olup ortalama bekleme süresi 100-300 gün arasındadır. Sakrofilik mikroorganizmaların sıcaklık istekleri 25 °C altındaki sıcaklıklardır. Bu sıcaklıklarda materyallerin veya fermentörün ısıtılmasına gerek yoktur, ancak bozunma performansı veya gaz üretimi düşüktür. Bu yüzden biyogaz tesislerinin ekonomik bir şekilde işletilmesi mümkün değildir [39].

- **Mezofilik Fermentasyon (20 - 40 °C):** Anaerobik fermentasyonda en çok uygulanan sıcaklık bölgesidir. Bekleme süreleri 20–40 gün arasında değişir. Bilinen metan oluşturunların büyük kısmının sıcaklık isteği 37 ve 42 °C arasındaki sıcaklık alanında bulunmaktadır. Mezofilik alanda faaliyet gösteren tesisler uygulamada en yaygın görülenlerdir, çünkü bu sıcaklık alanında nispeten yüksek bir gaz verimliliği ve iyi bir proses istikrarı sağlanabilmektedir [65].

- **Termofilik Fermentasyon (40 - 70 °C):** Çürütme hızı daha yüksek dolayısıyla bekleme süreleri daha kısadır [61,66]. Materyalin hijyenleştirilmesiyle sağlığa zararlı bakteriler öldürülecekse veya yüksek öz ısıya sahip (örneğin proses suyu) materyale bağlı yan ürün veya atık madde olarak kullanılacaksa, termofil kültürler fermentasyon için çok uygundur. Yine de fermentasyon prosesinin ısıtılması için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sıcaklık alanındaki fermentasyon prosesi rahatsız edici etkilere, materyal beslemesindeki düzensizliklere ve fermentörün çalışma tarzına karşı hassastır, çünkü termofil koşullar altında metanojenik mikroorganizmaların daha az sayıda çeşidi bulunmaktadır [65].

Sıcaklık bölgelerine göre metan bakterilerinin büyüme oranları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Sakrofilik mezofilik ve termofilik, termofilik sıcaklıklarda metanogenezlerin büyüme oranı

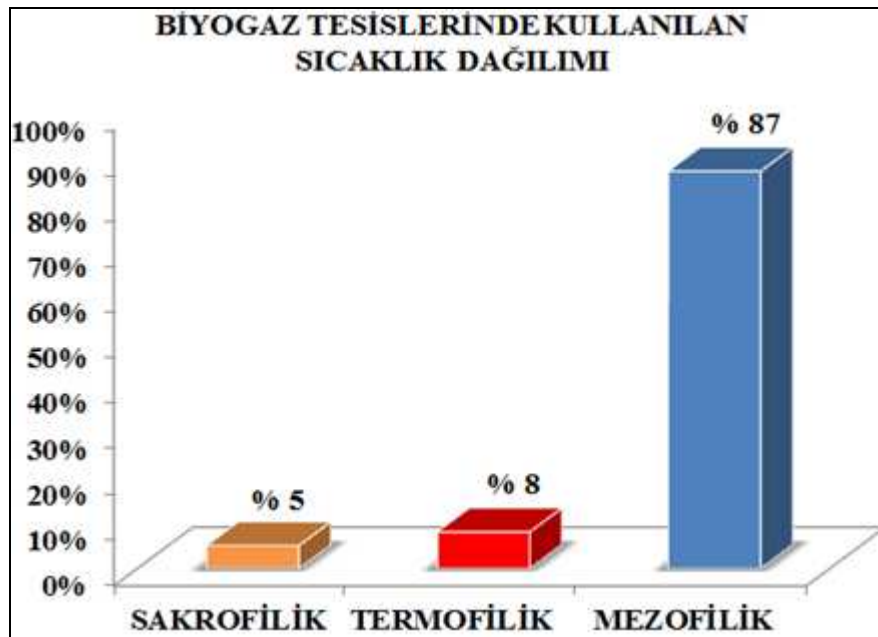
Anaerobik fermentasyon için en uygun sıcaklık aralığı mezofilik mikroorganizmalar için 32 - 42°C, termofilik mikroorganizmalar için 48 - 55°C'dir. Metan oluşturuıcı bakteriler sıcaklık değişimine karşı çok hassastırlar. Pek çok metan üreten mikroorganizma mezofilik şartlarda gelişir, pek azı termofiliktir. Genel olarak daha düşük sıcaklıklarda da metan üretilir. 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 [47].

Biyoreaktör sıcaklığı 22 °C nin üzerinde tutulduğu zaman daha iyi performans sağlanabilir. Biyoreaktör sıcaklığı 22 °C nin altına düştüğü zaman biyogaz üretimi düşer. Bu sıcaklıkta biyogaz tesisinin işletilmesi ekonomik değildir. Metan bakterileri ani sıcaklık değişimlerinden yüksek oranda etkilenirler. Eğer günlük sıcaklık değişimleri 5 °C'den fazla olursa, metan bakterileri faaliyetlerini durdurur ve asitleştirme evresi devam ettiği için pH düşer [67,68]. Çevre sıcaklığı 10 °C'nin altına düştüğünde gaz üretimi durur. Biyoreaktörlerde biyokimyasal reaksiyon esnasında sıcaklık;

- Psikofilik şartlarda $\pm 2^{\circ}\text{C}$ /saat
- Mezofilik şartlarda $\pm 1^{\circ}\text{C}$ /saat
- Termofilik şartlarda $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ /saat aralığında korunmalıdır.

Fermentörlerde sıcaklığın ani olarak değişmesi bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Bu durum biyokimyasal reaksiyonu yavaşlatır. Fermentörün ani sıcaklık değişimlerinden etkilenmesinin azaltılması için gece ile gündüz arasında sıcaklık farkının çok olduğu yerlerde fermentörleri yer altına gömülerek inşa edilebilir. Tesis için seçilen sıcaklığın sürekliliğinin sağlanması da önemlidir [69].

Günümüzde dünyada kurulu olan tesislerde kullanılan sıcaklık dağılımı Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Günümüzde dünyada kurulu olan tesislerde kullanılan sıcaklık dağılımı [70].

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 fermentör 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 [47,71]. Ancak reaktörü termofilik şartlarda çalıştırmak için ilave ısıya ihtiyaç vardır. Özellikle kış mevsiminde tesisten elde edilen ısı ile fermentörü 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 fermentör performansını ve sabit çalışma halini olumsuz yönde etkileyebilir, hatta verimliliği azaltabilir. Bu nedenlerle termofilik sistemlerin kontrolü daha zordur [60]. Termofilik fermentasyonda daha fazla H₂S (Hidrojen Sülfür) üretimi söz konusudur [72]. Fermente atığın gübre değeri termofilik fermentasyonda düşmektedir [73]. Bazı çalışmalarda termofilik reaktörlerin, serbest amonyak inhibisyonu nedeniyle, mezofilik reaktörlerden daha az verimli olduğu, ya da bir fark olmadığı, yüksek enerji girdilerinden dolayı termofilik olanların tercih edilmediği belirtilmektedir [74].

42– 50 °C arasında biyogaz oluşumunda bir kırılma meydana gelir. Bu sıcaklık civarında ne termofilik ne de mezofilik bakteriler aktivitelerini düzgün yürütebilirler [51,59,75,76]. Termofilik fermentasyonda optimum sıcaklık 55-60 °C arasındadır. 60 °C'nin üzerinde, sığır gübresiyle yapılan çalışmalarda gaz üretiminin yavaşladığı ve durduğu gözlenmiştir [77]. El-Mashad yaptığı çalışmada 50 °C'de, 60 °C'ye göre daha yüksek verim almıştır ve bunu yüksek sıcaklıkta serbest amonyak miktarının artmasıyla açıklamaktadır [78].

Ayrıca yükselen sıcaklıkla proses daha değişken hale gelir ve daha düşük kalitede ve yüksek miktarda çözünmemiş katı içeren nihai ürün oluşabilir. 20°C civarındaki sakrofilik sıcaklıklar, anaerobik fermentasyon için uygun değildir. Çünkü bu sıcaklık değerlerinde uzun zincirli yağ asitleri oluşur ve sistemde birikmeleri de köpük oluşumuna neden olarak sistemi inhibe edebilir [71]. Çevre sıcaklığı 10 °C'nin altına düştüğünde ise genellikle gaz üretimi durur [69].

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 [47].

Sonuç olarak biyoreaktörlerde sıcaklığın ani olarak değişmesi bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Bu da biyokimyasal reaksiyonu yavaşlatır. Biyogaz güç üretim tesisinin ısısından faydalanılarak reaktörün sıcaklığı sabit tutulabilir [69].

3.5.2. Hidrolik Bekleme Süresi

Biyogaz tesislerinin yapımında genellikle ekonomik düşünceler ön planda bulunmaktadır. Bundan ötürü fermentör büyüklüğünün seçiminde her zaman azami gaz verimi veya hammaddede bulunan organik kütlenin tümüyle bozunması hedeflenmemektedir. Organik içerik maddelerinin bütünüyle bozunmasının sağlanması istenildiği takdirde, bunun gerçekleştirilmesi için materyalin fermentörde çok uzun sürelerde kalması ve uygun büyüklükte tank hacmi sağlanmalıdır, çünkü bazı maddeler çok uzun sürelerden sonra bozunmaktadırlar. Dolayısıyla karşılanabilir bir ekonomik maliyetle optimum bozunma performansının sağlanmasına çalışılmalıdır. HRT (Hidrolik Bekleme Süresi) eklenen bir materyalin matematiksel olarak tekrar çıkartılınca kadar fermentörde kaldığı ortalama süredir [35]. Hesaplama için V_R (Reaktör Hacmi), $\dot{V}$ (Her Gün Eklenen Materyal Miktarı) ile ilişkilendirilir [36]. Hidrolik bekleme süresi gün olarak verilir.

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}} \text{ [d]} \quad (3.1)$$

Burada;

HRT : Hidrolik Bekleme Süresi [Gün].

V_R : Reaktör Hacimleri [m^3].

$\dot{V}$: Her gün Eklenen Materyal Hacimleri [m^3/d].

Kısacası hidrolik bekleme süresi, fermentördeki organik maddelerin bakteriler tarafından fermente edilmesi sonucu biyogaz üretilmesi için gerekli olan süre olarak tarif edilir [47]. Fermentör 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. Sürekli beslemeli sistemlerde, hidrolik bekleme süresi

yeterli olmazsa fermentörden bakteri kaçıışı olur ve uçucu yağ asidi konsantrasyonu artar. Böylece fermentasyon tam olarak gerçekleşemez ve biyogaz üretiminin düşmesine neden olur. Bu gibi durumlarda hidrolik bekleme süresi daha uzun seçilebilir [69].

Fermentör sıcaklığı arttıkça hidrolik bekleme süresi düşer. Çünkü yüksek sıcaklıkta biyokimyasal reaksiyonlar daha kısa sürede gerçekleşir. Dolayısıyla hidrolik bekleme süresini, uygulanacak sıcaklığa göre seçmek gerekir [47]. Hidrolik bekletme süresi ve katı madde bekletme süresi olarak ikiye ayrılır. Tek kademeli karıştırıcılı tip reaktörlerde her iki bekletme süresi de birbirine eşittir. Bekletme süresini etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Katı madde bekletme süresinin çok düşük tutulması, fermentasyon için gerekli zamanın olmaması nedeniyle sistemin çökmesine neden olur. Bu süre çok uzun seçilirse reaktör boyutları artar [75].

Besi maddelerinin türleri ve miktarları kalış süresine etki eder. Bekletme süresinin artırılması, hayvansal atıklar içerisinde bulunan özellikle selüloz içeriğinin fermentasyonunu sağladığı için, birim atık başına elde edilen biyogaz miktarını artırır [66,79,80]. Kesikli beslemede gaz üretimi başlangıçta yüksek olurken, daha sonra azalarak sıfırlanır. İlk evrede gaz üretiminin veya aynı anlamda fermentasyonun % 70 - 80'i gerçekleşir. İşte bu zaman aralığı, yani reaktöre hammadde girişi ve % 70 - 80 fermentasyon gerçekleşerek çıkışı arasındaki zaman aralığı bekletme süresini verir [81].

Reaktör 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 giderildiği kabul edilir. Hayvan atıklarında HRT'yi etkileyen en önemli basamak hidroliz kademesidir. Sığır gübresi daha fazla miktarda selüloz ve semi selüloz içerir. Karbonhidratlar ve yağlar daha kolay hidrolize olurken selülozlar daha zor hidrolize olurlar. Mezofilik şartlarda ortalama HRT şu şekildedir;

- Sıvı Sığır Gübresi 12 ile 30 gün
- Saman Yataklı Sığır Gübresi 18 – 36 gün
- Sıvı Domuz Gübresi 10 – 25 gün
- Bitki ile Karıştırılmış Sığır Gübresi 50 - 80 gün

- Sıvı Tavuk Gübresi 20 - 40 gün [69].

3.5.3. Organik Yükleme Hızı

Organik yükleme hızı, birim hacim fermentöre günlük olarak beslenen organik madde miktarı olarak tarif edilir. Organik yükleme hızı, sıcaklığa, atıktaki organik kuru madde miktarına ve bekleme süresine bağlıdır [69,71]. Yükleme oranı, günlük olarak fermentöre beslenen uçucu katıların miktarının belirlenmesini sağladığından, proses için önemli bir parametredir [71].

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 yüklemede 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 fermentör 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 [69]. Hacimsel yük değişiminin etkilerinden kaçınmak için fermentör 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 [47,82].

Yükleme oranı bir m³ çalışma hacmine bir zaman dilimi için kaç kilogram organik kuru madde beslemesi yapılması gerektiğini belirleyen bir faktör olduğundan şu şekilde hesaplanır [35]. Yükleme oranı kg OKM/(m³ d) olarak verilir.

$$B_R = \frac{\dot{m} \cdot c}{V_R \cdot 100} \left[\text{kg OKM m}^{-3} \text{ d}^{-1} \right] \quad (3.2)$$

B_R : Yükleme Oranı [$\text{m}^3 \text{ d}$].

$\dot{m}$: Bir Zaman Diliminde Eklenen Materyal Miktarı [kg/d].

c : Organik Materyal Konsantrasyonu [% OKM].

V_R : Reaktör Hacimleri [m^3].

Yükleme oranı her basamak için (gaz geçirmez, yalıtılmış ve ısıtılmış tanklar), sistemin bütünü için (bütün basamakların çalışma hacimlerinin toplamı) ve malzeme geri beslemesi dâhil edilerek veya edilmeyerek verilebilir. Referans büyüklüklerin değişmesi ile bir tesisin yükleme oranı için çok farklı sonuçlar elde edilebilir. Farklı biyogaz tesislerinin mümkün olduğu kadar anlamlı bir mukayesesi amacıyla, bu parametrelerin sistemin bütünü için ve malzeme geri beslemesini dikkate almadan, yani sadece taze materyal için tespit edilmesi tavsiye edilir [39].

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

- Düşük katı, % 2–10 ve altı TK (Toplam Katı),
- Orta katı, % 10–20 TK,
- Yüksek katı, % 20–40 TK [83 - 85].

Katı madde oranı çok düşük olduğunda, materyal içerisindeki katının çökmesi söz konusudur. Bu oran çok yüksek olursa gaz çıkışının engellenmesiyle karşılaşılır [86]. Besleme materyalinin % 8-13 arasında TK' ya sahip olması, biyogaz üretimi için uygun olmaktadır [51,67,79,81,87]. Hayvan atıklarının toplanması sırasında fazla oranda su kullanılması durumunda TK oranı % 2-5'e kadar düşebilmektedir. Bu da suyu ısıtmak için çok enerji harcanmasından dolayı sistem verimini düşürür [70]. Hayvansal atıkların kullanıldığı yüksek katılı sistemlerde toplam katı oranı % 22-25'e kadar çıkabilmektedir. Bu sistemlerde kesikli besleme kullanılmakta, atmosfere açık olarak bekletilen hammaddenin aerobik fermentasyonu sırasında oluşan 60–70 °C sıcaklık, daha sonraki havasız ortamda reaktörün ısı ihtiyacı olarak kullanılmakta ve yalıtımla ısı kaybı azaltılmaktadır. Bu sistemlerde bekletme süresi 30 gün olarak gerçekleştirilmektedir [88].

Yüksek katı miktarlarında asetik asit birikmesi yüzünden inhibasyon meydana gelir. Yapılan çalışmalarda nem oranının % 68 olması sınır değer olarak bulunmuştur. Bu nem oranına yakın besleme materyali kullanıldığında, oluşan prosese kuru fermentasyon adı verilmektedir [72].

3.5.4. pH ve Alkalinite

pH bir çözeltinin asit veya baz olma özelliğinin şiddetini gösteren bir terim olup çözeltide bulunan H^+ iyonu konsantrasyonunu ve daha kesin bir ifade ile hidrojen iyonunun aktivitesini göstermektedir [89].

- $pH < 7$ ise ortam asidik
- $pH > 7$ ise ortam bazik demektir.

Fermentörde kullanılan malzemenin pH'ı anaerobik fermentasyon prosesini etkiler. Hidrojen iyonu konsantrasyonunun mikrobiyal büyümede doğrudan etkisi vardır, çünkü aşırı asit oluşumu, fermentasyonu inhibe eder [71].

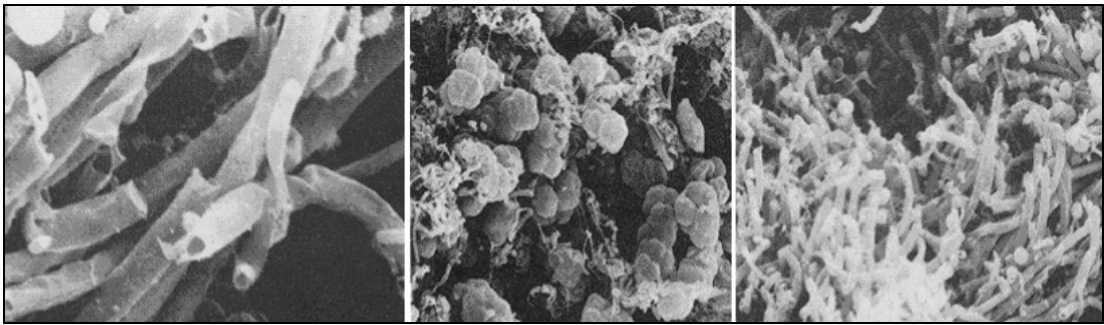
Biyogazın oluşum hızına ve biyogazdaki CO_2/CH_4 oranına, pH ve alkalinite büyük ölçüde etki etmektedir. Karışımın pH'ını 4 yapmak için gereken asit miktarı olarak tanımlanan alkalinite değerinin yüksek oluşu, sistemin tampon gücünün fazlalığını gösterir. Alkalinite değerindeki düşme veya gaz içerisindeki CO_2 miktarının artışı, pH düşmeye başlamadan önce sistemin dengesinin bozulduğunu belirten bir ölçektir [66,90,91].

1000–5000 $CaCO_3$ mg/l aralığında alkalinite değeri anaerobik fermentasyon için yeterlidir [75]. 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 fermentasyonu durdurabilir. Dolayısıyla ortamda asit oluşturuıcı bakteri konsantrasyonunda artma olur. Fermentörde 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 [47,69].

Fermentasyonun başlangıcında pH seviyesinin 6'ya kadar düştüğü gözlenmektedir. Bu asidifikasyon evresi nedeniyle oluşur. Daha sonra metan üretimi aşamasında amonyak derişiminin artışına paralel olarak pH düzeyi artarak, 7-7,5 arasında seyreder [92 - 94]. Anaerobik fermentasyon hafifçe alkalın ortamda devam eder. pH değeriindeki dalgalanmalara, sığır gübresinin besleme materyali olarak kullanıldığı reaktörlerde çok nadir rastlanmaktadır [81].

Biyogaz alevinde görülen sarı veya kırmızı renk, fermentasyon ortamının asidik olduğunun göstergesidir [51,73]. Fermentörlerde 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'ı 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 [69].

pH değeri asite doğru kaydığında kireç veya kül ilavesi sistemi tekrar dengeye getirebilmektedir. Fakat baza kayma durumunda asit ilavesi yapılmamalıdır. Bu sadece H₂S üretiminin artmasına neden olur [51,73].



Şekil 3.10. pH farklı değerlerdeki metan bakterisinin elektronik mikroskopla görüntüleri (10 µm) [95].

3.5.5. C/N Oranı

Karbon ve azot konsantrasyonu, anaerobik fermantasyonun performansını belirler. Genel olarak bu parametrelerden biri sistemde engelleyici unsur olarak gelişir [71]. Azot azlığı hücresel gelişimi engellediği için verimi düşürür, çok olması durumunda da amonyak birikimi söz konusu olur ve pH değeri 8,5'a yaklaşır. Bu da sistemin inhibe olmasına neden olur. Böylece kötü kokulu, yanmayan bir gaz elde edilir [51,68,94,86]. C/N oranının 8'den düşük olması durumunda bu etki görülür [40].

Organik materyaller, saman, çim gibi karbon yönünden zengin, idrar, insan ve tavuk atığı gibi azot yönünden zengin olmak üzere ikiye ayrılabilir. Karbon biyogaz oluşumu için gerekli olurken, azot anaerobik bakterilerin gelişimi ve yeniden üretilmesi için gereklidir [51]. Karbon ve azot gibi elementler anaerobik bakteriler için temel besinlerdir. C/N oranı, 25–30:1 Eğer karbon azot oranı dengede (uygun) değilse belli miktarlarda üre veya alçı taşı kullanılarak bu oran düşürülüp yükseltilebilir [96,97]. Bakteriler karbonu azotta göre 25–30 kat daha fazla kullanılır. Organik madde içerisinde karbonun en önemli kaynağı karbonhidratlar, azot kaynağı ise protein, nitrat ve amonyaktır [51,67].

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 oluşturan bakterilerin büyümesi için uygun pH şartları sağlanmış olur [69].

Biyogaz üretiminde kullanılan tüm besi maddeleri, belli oranlarda karbon, azot ve oksijen içerirler. Karbondan başka en önemli besi maddeleri azot ve fosfordur. Azot bakterilerin büyümesi ve çoğalması için gereklidir [69]. Tablo 3.9'da bazı materyallerin C/N oranları verilmiştir.

Tablo 3.9. Organik maddelerin C/N oranı [194].

Gübre	% C Kuru	% N Kuru	C/N Oranı	Taze Gübredeki Nem Oranı (%)	Su ile Seyreltme
Sığır Gübresi	30	1,66	18	80 – 85	1:1
Koyun Gübresi	83,6	3,80	22	75 – 80	1:1
Kümes Hayvanları Gübresi	87,5	6,55	14	70 -80	1:3
Domuz Gübresi	76	3,8	20	75 – 80	1:2
At Gübresi	33,4	2,3	15	80 – 85	2:3
Kaz	54	2	27	70 – 80	2:3
Güvercin Gübresi	50	2	25	70 – 80	
İdrar	15	15	1	90 – 95	
Kan	36	12	3	90 – 95	
Balık Atığı	56	7	8	55 – 75	
Kesimhane Atığı	64	8	8	55 – 75	
Çiftlik Gübresi	42	3	14	75 – 80	
Evsel ve Tarımsal Atıklar	% C Kuru	% N Kuru	C/N Oranı	Taze Gübredeki Nem Oranı (%)	Su ile Seyreltme
İnsan Dışkısı	48	6,0	8	50 – 70	3:7
İdrarlı İnsan Dışkısı	70	7,0	10	50 - 70	
Patates Kabuğu	37,5	1,5	25	50 - 60	
Mutfak Atığı	62,5	2,5	25	5 - 15	
Ekmek	50	2	25	50 - 60	
Gazete	40	0,05	800	5 – 15	
Taze Çim	48	4	12	40 - 60	
Yulaf Samanı	50,4	1,05	120	20 - 40	
Pirinç Samanı	18	0,3	60	20 - 40	
Yapraklar	55	1,0	55	25 - 40	
Yer Fıstığı Kabuğu	40	2,0	20	25 - 40	
Soya Fasulyesi Sapı	64	2,0	20	25 - 40	
Ağaç Yaprakları	75	1,5	50	40 – 60	
Şeker Kamışı	45	0,3	150	25 - 40	
Soya Fasulyesi	17,5	3,5	5	10 – 15	
Pamuk Tohumu	12,5	2,5	5	10 – 15	
Hardal	39,0	1,5	26	10 – 15	
Su Sümbülü	30,4	1,9	16	85 - 90	

Sığır gibi geniş getiren hayvanların atığında azot daha az bulunur. Çünkü sindirim sırasında bakteriler azotun bir bölümünü kullanır. Bu yüzden diğerlerine göre C/N oranı yüksek olmaktadır [73]. C/N oranını ayarlamak için değişik besleme materyalleri karıştırılmalıdır. Örneğin C/N oranı 5-8 civarında olan tavuk atığıyla, 70 civarında olan samanın karışımı iyi bir besleme materyali olmaktadır [81]. Bitki atıklarının 100 olan C/N oranı kompostlama yoluyla bir haftada, 20'ye kadar düşürülebilmektedir [51].

3.5.6. Mikroorganizma Konsantrasyonu

Havasız ortam koşullarında organik atıkların parçalanması ve biyogaz üretimi kendiliğinden başlar. İşletilmekte olan başka bir tesisten alınan çamur (aşı) yüksek mikroorganizma içermesi nedeni ile yeni çalışacak tesisin işletmeye alınma sürecini kısaltır [98]. 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. 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 [47]. Çünkü sistemin tam kapasite çalışması için aşılınmış çamur gereklidir. Bu da başlangıç aşamasında oluşturulur [41].

3.5.7. Karıştırma

Yüksek bir biyogaz üretimi gerçekleştirmek için bakterilerle materyalin yoğun temasına ihtiyaç duyulur, bu da genel olarak fermentasyon tankının karıştırılmasıyla elde edilir. Karıştırılmamış bir fermentörde bir süre sonra segregasyonla (çökelme) birlikte katman oluşumu gözlemlenir, bu da fermentör içerisinde bulunan materyalde yoğunluk farklılığına ve gaz üretiminde azalmaya neden olur. Bu esnada bakteri kütesinin büyük kısmı yüksek yoğunluk nedeniyle alt kısımda toplanırken, bozunacak materyal genellikle üst katmana çıkar. Bu durumda temas alanı her iki katmanın birleştiği alanla sınırlıdır ve pek az bozunma meydana gelir. Bunun yanı sıra yüzen katı maddeler, gaz çıkışını engelleyen bir yüzer örtü meydana getirirler [35].

Anaerobik çürütücülerin performansı öncelikle reaktördeki substratın bekleme süresinden, yaşayabilecek durumda olan bakteriyel popülasyon ve giren substratın birbirleri arasındaki temas derecesinden etkilenir. Verimli substrat dönüşümü elde edilmesinde, karıştırmanın önemi pek çok araştırmacı tarafından vurgulanmıştır [99 – 103].

Reaktördeki karıştırma işleminin sisteme kazandırdığı kararlılığın sağlanabilmesi ve sürdürülebilmesi açısından faydalar, şu şekilde sıralanabilir [47,60].

- 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,
- Fermentör içerisinde sıcaklık dağılımının homojenliğini sağlar,
- Fermentördeki bakteri popülasyonu yoğunluğunu düzenler,
- Reaktör içerisinde ölü alanların oluşumunu engeller [47,60].

Ayrıca besleme materyalinin içerisinde bulunan büyük parçacıkların küçültülmesi ve kütle aktarım dirençlerinin azaltılması için de karıştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [90,104]. Eğer besleme materyali içerisinde topaklaşma varsa, biyogaz üretimi düşer [51]. Karıştırmanın olmadığı reaktörlerde durgun bölgeler oluşmakta, eşit olması gereken hidrolik ve katı bekletme süreleri farklılaşarak katı bekletme süresi artmaktadır. Bu da reaktör içerisinde katı madde konsantrasyonunun artmasına, zamanla reaktör efektif hacminin azalarak tıkanıklıkların oluşmasına yol açmaktadır [105]. İyi ve uygun bir karıştırma, biyogaz üretimini % 50 oranında artırmaktadır [106]. Fakat günde bir kere karıştırmanın, sürekli karıştırmaya göre, gaz verimine çok fazla etki etmediği belirtilmektedir [90].

Yavaş bir şekilde karıştırma, hızlı ve verimli bir fermentasyon için gerekli olmaktadır. Genellikle günlük yüklemelerdeki hareket, gaz çıkışının ve termal taşınımın etkisi karıştırmayı doğal yoldan sağlamaktadır [75,107]. Fakat büyük reaktörlerde ve yüksek yükleme oranlarında bu karıştırma etkisi yetersiz kalmaktadır. Yeterli karıştırma, reaktör içerisinden çeşitli yerlerden alınan numunelerdeki katı madde oranlarındaki farklılaşmanın % 10'un altında olmasıyla belirlenebilir. Kum ve diğer çökeltilerin biriktiği alt bölüm ve yoğunluğun az olduğu üst bölgedeki köpük formu bu değerlendirmenin dışında tutulmalıdır [108]. Aşırı ve hızlı karıştırma sonucunda birbirleriyle ilişkili bakterilerin teması kaybolmakta, işlevlerini yerine getirememelerinden dolayı sistem

verimi düşmektedir [94,95,109]. En uygunu dört saatte bir, hassas karıştırma [106,107]. Karıştırılmalı reaktörlerde hidrolik bekletme süresi karıştırmasızlara göre daha düşük olmaktadır [106,107,110].

Tesisin ilk çalıştırma aşamasında karıştırma, pH düşüklüğü ve sistem dengesizliği yarattığı için önerilmemektedir. % 5 TK oranına sahip materyalin fermentasyonunda karıştırıcılı ve karıştırıcısız reaktörler arasında biyogaz verimleri açısından önemli bir fark yoktur. Çünkü bu düşük TK oranlarında gaz çıkışı gerekli karıştırmayı doğal olarak sağlamaktadır [95]. Fakat % 10 ve üzeri TKM oranına sahip materyallerin fermentasyonunda karıştırma, verimi % 30'lara varan oranda artırabilmektedir [111]. Yine % 15 TKM (Toplam Katı Madde) oranı ve üzerinde biyogazın sirkülasyonu ile karıştırmanın yeterli olmadığı belirtilmektedir [112].

Karıştırma işlemi çok etkin ve dikkatli bir şekilde yapılmalı ve işlem esnasında aşağıda belirtilen konulara dikkat edilmelidir [47].

- Fermentörden 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 [47].

3.5.8. İnhibitör ve Toksik Maddelerin Etkisi

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 bileşikler, yağ asitleri ve aminoasitler gibi organik asitler, NO₃ (Nitrat), NH₄ (Amonyum), NH₃, ağır metaller, tanenler, dezenfektanlar, herbisitler, insektisitler, yüzey aktif maddeleri ve antibiyotikler önemli inhibitörlerdendir [47,69].

Reaktöre toksik madde girişi olduğunda metan bakterileri kolaylıkla inhibe olur. Fakat asit bakterilerinin bu şartlara daha dayanıklı olması nedeniyle uçucu organik asit

üretimi devam eder ve sistemin verimi düşer [113]. Fermente materyal içerisinde asetik asit seviyesinin 800 mg/l'te üzerine çıkması bunun göstergesidir. Propionik asit/asetik asit oranının 1,4 üzerine çıkması da bu göstergelerden biridir [114]. 0,01 mg/l çözünmüş oksijen, metan bakterilerinin tamamen inhibe olmasına neden olur [76,115].

Fermantasyon prosesinin ürünlerinden biri olarak ortaya çıkan H_2S , ayrışmamış ve çözünmüş formda hücre zehiri olarak yaklaşık 50 mg/l konsantrasyonda bile bozunma prosesini engelleyebilir. pH değerinin düşmesiyle birlikte serbest H_2S oranı yükselir, bu da engelleme tehlikesini arttırır. H_2S miktarını düşürmenin bir yolu, demir iyonlarının sülfid olarak çökeltilmesidir. H_2S başka ağır metallerle de tepki verir ve sülfid iyonlarının oluşmasıyla (S_2^{2-}) bağlanır ve çökeltilir. Yüksek sülfürlü materyallerin beslenmesi durumunda, H_2S in oluşumu artar ve toksik etkiye neden olur. Yüksek katı ile çalışan reaktörlerde, amonyak ve H_2S konsantrasyonu da yüksek olacağı için toksik etki muhtemeldir. Bu yüzden sulandırmanın pozitif etkisi vardır [80]. Ancak bazı zararlı maddelerin başka maddelerle etkileşime girmesi söz konusu olabilir. Örneğin ağır metaller sadece çözünmüş durumda fermantasyon prosesine zarar verirler. Ancak ağır metaller yine aynı şekilde fermantasyon prosesinde ortaya çıkan hidrojen sülfür tarafından bağlanır ve zor çözünür sülfidler olarak etkisizleşirler. Metan fermantasyonunda H_2S daima oluştuğu için prosesin ağır metaller tarafından sekteye uğratılması genel olarak beklenmez [36]. Ancak bu antibakteriyel etkileri nedeniyle çok düşük konsantrasyonlarda (40-50 mg/l) bile toksik olan ve örneğin tarımsal işletmelerde tınak dezenfeksiyonu için kullanılması nedeniyle bulunan bakır bileşikleri için geçerli değildir. Sülfür, enzimlerin oluşması için yeterli konsantrasyonda bulunması gereken önemli bir mikro besin maddesi olup, sülfid olarak daha fazla çökmesi aynı şekilde metanojenezin engellenmesine yol açabilir. Dolayısıyla çeşitli maddelerin engelleyici etkileri çok sayıda faktöre bağlıdır ve sabit sınır değerlerinin belirlenmesi çok zordur [39].

C/N oranı 10'un altında olursa, hammaddenin amonyak zehirlenmesine yol açma olasılığı vardır [76,116]. Fermentasyon sırasında amonyak proteinlerden üretilmektedir [117]. Amonyak artışı düşük seviyede olduğu zaman biyogaz üretimini artırırken, yüksek seviyede inhibisyona neden olmaktadır [118]. Amonyak miktarı sığır atıklarında 3-5 g/kg iken tavuk atıklarında 15-20 g/kg'a çıkmaktadır [119]. Tavuk atığında protein ve amino asitlerin fazla olmasından kaynaklanan yüksek azot içeriği, amonyumun toksik etkisine

neden olabilmektedir [120]. Amonyum miktarı yaklaşık olarak 1700 mg/l olduğunda inhibasyon etkisi başlar ve 3000 mg/l olduğunda sistem tamamen inhibe olur [121]. Fakat yeterli zaman verildiğinde sistem bu oranın 5000-7000 mg/l'ye kadar çıkmasına dayanabilir, ancak amonyak miktarı 200-300 mg/l'yi geçmemelidir [122]. Domuz atığı da yüksek oranda azota sahiptir ve fermentasyon sırasında amonyak miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu oranın inhibasyona sebep olmayacak seviyeye indirilmesi için zeolitle ön işlem yapılabilir [123]. Amonyak inhibasyonu, termofilik bölgede mezofiliğe göre daha fazladır. Bu yüzden domuz ve tavuk atığıyla çalışan biyogaz tesislerinde mezofilik sıcaklık bölgesi tercih edilmektedir [30]. Yüksek sülfürlü materyallerin beslenmesi durumunda, H₂S in oluşumu artar ve toksik etkiye neden olur. Yüksek katı ile çalışan reaktörlerde, amonyak ve H₂S konsantrasyonu da yüksek olacağı için toksik etki muhtemeldir. Bu yüzden sulandırmanın pozitif etkisi vardır [80]. Çözünen sülfür miktarı 200mg/l yi geçtiğinde toksik etkiye neden olur. Fakat ortamda metallerin bulunması sülfürün çözünmesini engeller [115,124].

Antibiyotik girişi genellikle çiftlik gübresi veya hayvani yağlar yoluyla gerçekleşir, fakat her antibiyotiğin engelleyici etkisi çok farklı olabilir. Fakat esansiyel mikro elementler de yüksek konsantrasyonlarda mikroorganizmalar için toksik olabilir. Mikroorganizmalar bu tür maddelere belli bir ölçüde uyum sağlayabildikleri için, bir maddenin hangi konsantrasyondan itibaren zarar vermeye başlayacağını tespit etmek çok güçtür [35]. Sığırlara verilen lasalocid ve salinomycin gibi antibiyotikler, termofilik şartlarda anaerobik fermentasyon üzerinde önemli bir etki yaratmamıştır. Fakat diğer bir antibiyotik olan monensin verildiğinde, mezofilik ve termofilik anaerobik fermentasyon tamamen durmakta ve metan üretiminin tekrar başlaması için yaklaşık 40 gün gerekmektedir [125].

Tablo 3.10. Anaerobik bozunma proseslerinde zararlı maddeler ve zararlı konsantrasyonları [126].

Zararlı Madde	Engelleme Konsantrasyonu	Açıklama
Oksijen	> 0,01 mg/l	Bağlayıcı anaerobik metanojen arkelerin engellenmesi
Hidrojen Sülfür	> 50 mg/l H ₂ S	pH değeri düştüğü zaman engelleme etkisi artar.
Uçucucu Yağ Asitleri	2.000 mg/l Hac (pH = 7,0)	pH değeri düştüğü zaman engelleme etkisi artar. Bakterilerin yüksek adaptasyon yeteneği
Amonyum Azot	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	pH değeri düştüğü ve sıcaklık yükseldiği zaman engelleme etkisi artar. Bakterilerin yüksek adaptasyon yeteneği.
Ağır Metaller	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Sadece çözünebilir metaller engelleyici etkiye sahiptir. Sülfidin çökeltilmesi ile zehirden arındırma
Dezenfeksiyon Aracı (Antibiyotikler)	Veri Yok	Ürüne Özgü Engelleme Etkisi

3.6. Türkiye’de Tavuk İşletmeciliği ve Atık Problemi

3.6.1. Tavuk Yetiştiriciliği

Türkiye’de modern tavukçuluğun temelleri Cumhuriyet’in kuruluşundan sonra atılmış ve özellikle 1960’lı yıllardan sonra hızlı bir gelişme göstermiştir. Özellikle 1980 yılından sonra, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi yükseliş eğilimine girmiştir [127]. Yıllar itibariyle Türkiye’de tavuk varlığındaki gelişmeler Tablo 3.11’de gösterilmiştir.

Tavukçulukla ilgili işletmeleri kurarken üzerinde öncelikle ve önemle üzerinde durulması gereken konuların başında yer seçimi gelir. Koku, sinek gibi istenmeyen özelliklerinden kaçınacak kadar uzakta, ancak bakım-besleme işlerinin kolayca yapılabileceği kadar yakında kurulmalıdır, yönetim binaları ve konutlardan 200-300 m uzaklıkta olması uygundur ayrıca kümesler, işletme binaları ve konutlara göre bölgedeki egemen rüzgârlara ters yönde yapılmalıdır, böylece koku etkisi önemli ölçüde azaltılmış olur [128,129].

Tablo 3.11. Türlerine göre kümes hayvanları sayısı [130].

Yıllar	Yumurta Tavuğu	Et Tavuğu	Hindi	Kaz	Ördek
1991	50 826 656	88 379 548	3 132 676	1 599 831	1 112 015
1992	52 224 952	100 305 100	3 332 794	1 752 495	1 154 743
1993	58 179 047	120 080 935	3 340 241	1 687 596	1 171 961
1994	57 842 034	125 842 269	3 441 995	1 719 833	1 186 891
1995	57 324 654	71 689 773	3 291 000	1 745 163	1 199 925
1996	53 883 070	99 073 900	3 063 540	1 641 915	1 093 860
1997	61 401 783	104 870 702	5 327 501	1 794 610	1 828 792
1998	69 722 271	167 275 380	3 805 345	1 771 327	1 339 468
1999	71 885 207	167 862 730	3 762 516	1 670 916	1 294 824
2000	64 709 040	193 459 280	3 681 558	1 496 604	1 104 176
2001	55 675 750	161 899 442	3 254 018	1 397 560	913 748
2002	57 139 257	188 637 066	3 092 408	1 400 136	832 091
2003	60 399 520	217 133 076	3 994 093	1 336 775	810 910
2004	58 774 172	238 101 895	3 902 346	1 250 634	770 436
2005	60 275 674	257 221 440	3 697 103	1 066 581	656 409
2006	58 698 485	286 121 360	3 226 941	830 081	525 250
2007	64 286 383	205 082 159	2 675 407	1 022 711	481 829
2008	63 364 818	180 915 558	3 230 318	1 062 887	470 158
2009	66 500 461	163 468 942	2 755 349	944 731	412 723
2010	70 933 660	163 984 725	2 942 170	715 555	396 851
2011	78 956 861	158 916 608	2 563 330	679 516	382 223
Not : 2011 Yılı bilgileri geçicidir.					

Tavukçulukta genellikle 3 tip kümes sistemi kullanılmaktadır;

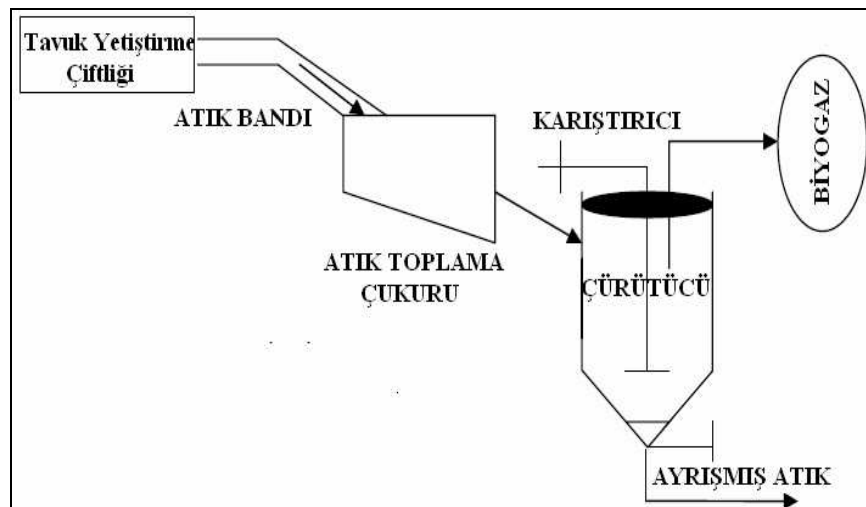
- **Kalın altlık sistemi (yer sistemi):** Kümes tabanı tamamıyla beton ya da sıkıştırılmış topraktan oluşur. Zemin üzerine 10-15 cm kalınlığında altlık serilir. Bu sistemde altlık malzemesi gereksinimi, bakteriyel hastalıkların kontrol edilememesi, gübrenin sürekli temizlenme zorunluluğu vardır, bu sebeplerden dolayı büyük kapasiteli üretim çiftliklerinde tercih edilmemektedir [131].

- **Izgara sistemi:** Izgara sisteminin kullanılmasının amacı altlıklı yer kümesinde görülen sorunların ortadan kaldırılmasıdır. Bu sistemin yer tipine göre altlık gerektirmemesi, bakteriyel hastalıkların daha iyi kontrol edilmesi, gübrenin yumurtlama dönemi boyunca temizlenmesine gerek olmaması gibi üstünlüklerine karşın, tavukların dinlenecekleri bir yerin olmaması ve kırık yumurta sayısının fazla olması gibi sakıncaları bulunmaktadır [129,132].

▪ **Kafes sistemi:** Bu sistemde tavuklar kümes içerisindeki kafeslerde barındırılırlar. Çok iyi bir havalandırma düzenini gerektiren bu sistemin yararı metre kareye düşen tavuk sayısının yüksekliği ile yer ve işgücünden tasarruf sağlanmasıdır. Altlık sorunu yoktur, yumurtalar daha temizdir. Ayrıca tavuklar fazla dolaşıp enerji kaybetmedikleri için yemden yararlanma biraz daha yüksektir. Gübrenin alta geçmesi ve tavukların birbirleriyle temasının az olması nedeniyle hastalık kontrolü daha kolaydır. Bu sistemde kafes altlarına biriken gübreyi sık sık temizlemek gerekir, aksi takdirde gübrede fazla miktarda sinek ürer ve sorun yaratır [131].

3.6.2. Tavuk Atık Üretimi ve Atıkların Özellikleri

Yumurta tavukçuluğu işletmelerinde günlük olarak uzaklaştırılması gereken gübre miktarı, her bir tavuğun gübre üretimine ve kümes kapasitesine bağlı olarak değişmektedir. Gübreliliğin kapasitesini belirlemek amacıyla bir tavuğun günlük gübre üretim miktarları, 150-200 g [129,133] veya 175 g [129,134] olarak alınabilir. Tavuk yetiştirme çiftliğinden çıkan atıklar ise Şekil 3.11’de gösterildiği gibi işlenip tarımsal amaçlı kullanılabilir. Proses ürünü olan biyogaz, enerji elektrik enerjisine dönüştürülüp kullanılabileceği gibi tesisin ısıtılmasında da kullanılabilir. Tavuk atığı denildiği zaman sadece ayrışmaya uğrayan besinlerden arta kalan posa ve metabolizma artıklarından ibaret olan tavuk dışkısı değil, aynı zamanda kümeslerde kullanılan yataklık malzemesiyle birlikte oluşan karışım da ifade edilmektedir [135].



Şekil 3.11. Bir tavuk yetiştirme çiftliğinde atıkların işlenme süreci [135].

Tavuklardan elde edilen atığın miktarı, bileşimi ve değeri; hayvanın tipi, ağırlığı, yediği yemin bileşimi ve miktarı ile birlikte kümeste kullanılan yataklığın cinsi ve miktarına da bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak % 10 ham selüloz, %26 kül, % 33 ham protein, % 10 gerçek protein, % 2,6 eter ekstratı, % 3-6 toplam azot ve % 3 P₂O₅ (Fosfor Pentaoksit) bulunmaktadır [135].

Tavuk atığının diğer hayvan atıklarından en önemli farkı, tavuğun bilinen bir fizyolojik özelliğinin sonucu olarak oluşmasıdır. Tavukta üreme organları, kalın bağırsaklar ve idrar yolları aynı delikle (kloak) dışarı açıldıklarından, dışkı genellikle idrarla karışmış olarak dışarı atılır ve bu nedenle azot bakımından oldukça zengindir. Taze tavuk artığının su muhtevası % 70-80, kuru madde miktarı % 20-30 kadardır. Kurutulmuş tavuk artığında toplam azot miktarı % 3-6 arasındadır. Bu ise % 18-36 proteine eşdeğerdir. Kuru tavuk artığındaki toplam azotun yani ham proteinin varlığı; artığın elde edilişi, saklandığı yer ve süre ile ilişkilidir [136].

Kümesçilik endüstrisinin büyümesinin bir sonucu olarak kümes hayvanları kesim yerleri Tablo 3.12 'de verildiği gibi yüksek miktarda organik katı atık ve yüksek miktarda yan ürün oluştururlar.

Tablo 3.12. Kümes çiftliklerinde ve kümes hayvanları kesim yerlerinde üretilen organik katı atıkların miktarı ve özellikleri [137].

Tür	TKM (%)	UKM (% TKM)	Kjeldahl – Azotu (% TKM)	Protein (% TKM)	Yağlar (% TKM)	Metan Potansiyeli (m ³ /kg – UKM)	Metan Potansiyeli (m ³ /kg – Islak Madde)
Hayvan Ölüsü	37	-	-	-	-	-	0,20 – 0,25
Yatak Malzemesi	52 – 81	61 – 65	3,2 – 5,7	-	-	0,14 – 0,22	0,10 – 0,15
Gübre	20 – 47	60 – 76	4,6 – 6,7	-	1,5 – 2,1	0,2 – 0,3	0,04 – 0,06
Kuş Tüyü	24,3	96,7	15	91	1 – 10	0,2	0,05
Kan	22	91	7,6	48	2	0,5	0,1
İç Organlar, Ayak ve Baş	39	95	5,3	32	54	0,7 – 0,9	0,3
Kırıntılar ve Kemikler	22,4	68	68,6	51	22	0,6 – 0,7	0,15 – 0,17

3.6.3. Tavuk Gübresinin Özellikleri

Tavuk dışkısı organik ve inorganik maddelerden oluşmaktadır. Organik kısmını ürik asit, NH_3 tuzları, üre, karelin, kreatinin, az miktarda aminoasitler, ölü bağırsak hücreleri, safra tuzları, pigmentler, hormonlar, vitaminler ve diğer bazı bileşikler oluşturmaktadır. Tavuk dışkısında karbonhidrat miktarı % 35–40 arasında değişmektedir. Bu karbonhidratlar genelde tavuk tarafından sindirilemeyen selüloz, pentozan ve ligninden oluşur [138].

Besin maddesi olarak gübrenin en önemli kısmını azot oluşturur ve kolayca da kaybedilebilir. Dışkıdaki azotun yaklaşık % 80 kadarı ürik asit şeklindedir [139]. Tavuk dışkısının içeriği birçok etkene bağlı olarak değişir. Bu etkenler;

- Dışkının kaynağı,
- Hayvanın besini,
- Hayvanın yaşı,
- Hayvanın yetiştirme koşulları,
- Dışkının saklanma şeklidir [140].

Yılda bir tavuktan ortalama 55 kg dolaylarında dışkı çıkar. Bu dışkının yaklaşık 8,6 kilogramı organik maddedir. Taze tavuk dışkısı % 70–80 arasında su içerir. Bu taze tavuk dışkısının %1'i N (Azot), % 0,9'u P (Fosfor), % 5'i K (Potasyum)'dur. Toplam kuru maddenin % 5'i N, % 3,9'u P, %2,4 'ü K'dır [140]. Değişik tavuk atıklarının gübre olarak besin bileşimi Tablo 3.13'te görülmektedir.

Tablo 3.13. Değişik tavuk atıklarının gübre olarak besin bileşimi [141].

Dışkı Tipi	Nem (%)	N (kg/ton)	P (kg/ton)	K (kg/ton)
Taze Dışkı	75	13,1	4,5	3,6
Depolanmış Dışkı	63,9	10,9	5,9	7,2
Piliç Altlığı	18,9	32,6	11,3	13,6
Yumurtacılık Altlığı	22,1	22,7	10,4	16,3
Sulu Gübre	92	10	5,4	3,2

Tablo 3.14'te nem düzeyine göre tavuk gübresinin bileşimi görülmektedir.

Tablo 3.14. Nem düzeyine göre tavuk gübresinin bileşimi [141].

Gübre Çeşidi	Su İçeriği	Yaklaşık Besin Değeri (%)		
		Azot	Fosfor	Potasyum
Taze Gübre	75	1,0	0,6 – 1,3	0,6 – 0,7
Kısmen Kurutulmuş	50	0	1,1 – 2,6	1,1 – 1,4
Kuru Gübre	25	3,0	1,7 – 3,9	1,7 – 2,1
Tamamen Kurutulmuş	0	4,0	2,3 – 5,2	2,3 – 2,8

Anaerobik arıtmıdan sonra elde edilen gübre ile normal koşullarda üretilen gübre kıyaslandığında anaerobik arıtımından sonra elde edilen gübrenin daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Tablo 3.15' ten anlaşıldığı gibi biyogaz üretilen gübrede organik madde, C (Karbon) ve N miktarları normal koşullarda üretilmiş olan gübredekinden daha fazladır [141].

Tablo 3.15. Biyogaz üretilmiş ve normal koşullarda elde edilmiş gübrelerin kimyasal özellikleri [141].

Gübreler	Kuru Madde (%)	Organik Madde (%)	C (%)	Toplam N (%)
Biyogaz Üretilmiş	25	16,4	8,22	0,85
Normal Gübre	25	15,0	8,00	0,50

3.7. Biyogaz Tesislerinin Avantajları ve Dezavantajları

Anaerobik fermentasyon 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.

3.7.1. 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 [41].
- Aerobik proseste giren 100 birim karbonun % 42'si CO₂'te, % 5'i atıksuda, % 48'i çamurda birikirken, anaerobik proseste giren 100 birim karbonun % 76'sı CO₂ ve CH₄'te, %20'si atık suda, % 4'ü çamurda birikir. Böylece enerji eldesi için, oluşan gazlar daha fazla miktarda ve daha etkin şekilde kullanılır.
- Aerobik bozunmada CO₂ ve H₂O (Su) gibi düşük enerji bileşikleri oluşur. Büyük miktarda enerji havaya karışır, kaybolur (anaerobik prosesten 20 kat daha fazla). Anaerobik bozunmada ise yüksek enerjili ürünler oluşur. Bunlar diğer organizmalara nitruent sağlarlar (alkoller, organik asitler) ya da enerji olarak kullanırlar (biyogaz) [47].
- Anaerobik arıtmada, diğer biyolojik yöntemler ile karşılaştırıldığında daha yüksek organik yükleme oranları ve daha az çamur oluşur [48].
- 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 [41].

3.7.2. Biyogaz Tesislerinin Dezavantajları

Yukarıda tanımlanan pek çok avantajın yanı sıra biyogaz tesislerinin söz konusu olabilecek dezavantajları şöyledir;

- Tesis işletimi sırasında oluşan biyogaz, yanıcı ve patlayıcıdır. Sistem işletim şartlarının çok dikkatli seçilmesi ve kontrolünün düzenli yapılması gerekir [71].
- Atıklarda bulunması muhtemel patojen bakteriler nedeniyle, atıkların taşınması ve depolanması süresince hijyen koşullarına dikkat edilmelidir [48].
- 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.
- Çiftlik ölçekli biyogaz tesislerinde ilave maliyet ve iş gücü gereklidir [41].

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

AB ülkelerinde, orta ve büyük ölçekli sistemler daha çok tercih edilmektedir. Özellikle Danimarka’da merkezi büyük ölçekli biyogaz tesisleri ön plandadır. 20 adet merkezi ve 35 adet orta ve büyük ölçekli çiftlik tipi sistemlerden elde edilen enerji yıllık 2,6 PJ’dur ve toplam hayvansal atıkların % 3’ü değerlendirilmektedir [142]. Bu merkezi sistemlerin 2/3’ü termofilik, kalanı mezofilik sıcaklık bölgesinde çalıştırılmaktadır [143]. Biyogazın kullanımı da gelişmekte olan ülkelere göre farklılık göstermekte, örneğin

İsveç’te üretilen toplam 5 PJ enerji eşdeğerinde biyogazın % 10’u artırılarak otomobil, otobüs ve kamyonlarda yakıt olarak kullanılmaktadır [144,145].

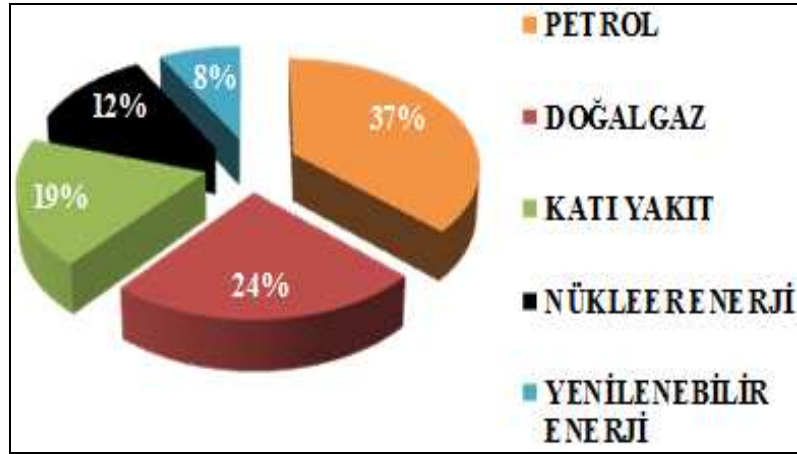
Türkiye için biyogazın kırsal kesimde, özellikle ısıtma ve pişirme amaçlı kullanımı ekonomik görülmektedir [146]. Türkiye’de sadece hayvansal atıklardan üretililecek biyogaz miktarı 2,2–3,9 milyar m³ olarak tahmin edilmektedir [147]. Yine hayvansal atıklardan sağlanabilecek biyogaz potansiyeli yaklaşık olarak 53,6 PJ enerji eşdeğeri civarındadır [148]. Günümüz de Türkiye de Üniversitelerin Teknik Eğitim, Fen Edebiyat, Mühendislik Fakülteleri’nde ve Fen Bilimleri Enstitülerinde biyogaz üretimi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır [149].

3.8.1. 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. 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 artırmaktadır. 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 YEK (Yenilenebilir Enerji Kaynakları)’den sağlanması, taşıtlarda kullanılan yakıtların (benzin ve dizel) içinde en az %10 oranında biyoyakıt bulunması, enerji verimliliğinin %20 arttırılması ve sera gazı emisyonlarının 1990 yılına oranla en az %20 azaltılması hedeflenmiştir. Bu hedef AB 20-20-20 hedefi olarak da ifade edilmiştir [150].

Belirlenen hedef kapsamında her bir üye ülkenin 2020 yılı için YEK kullanımındaki hedef oranı da ayrı ayrı saptanmıştır. 2006 yılı itibariyle AB-27’nin enerji tüketimi 1.825 MTEP (Milyon Ton Eşdeğer Petrol) civarında olup, bu tüketimi yaklaşık %33 oranla ulaştırma sektörü, %28 oranla sanayi sektörü ve %26’lık oranla hane tüketimi

oluşturmaktadır. 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 [151]. Şekil 3.12'de AB ülkelerinin enerji kaynaklarının kullanım oranı gösterilmiştir.



Şekil 3.12. AB enerji kaynakları kullanımı [151].

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 [151].

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 Tablo 3.16'da yer almaktadır [152].

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 [41].

Tablo 3.16. AB ülkeler bazında biyogaz birincil enerji üretimi [152].

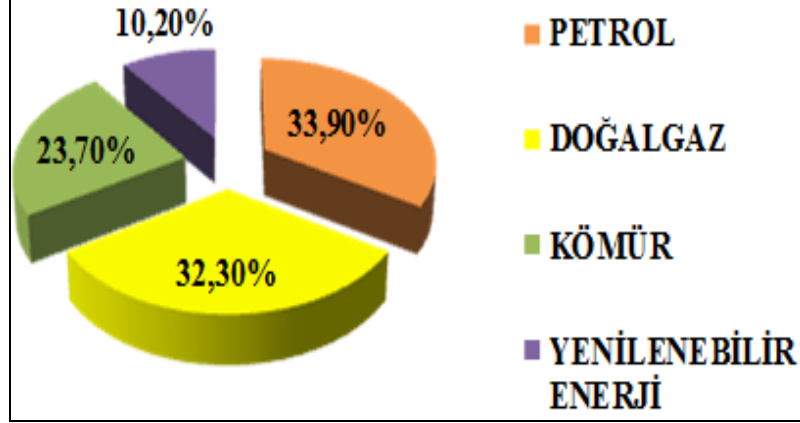
Ülkeler	2006				2007 (Tahmin Edilmekte Olan Üretim)			
	Depo Gazı (KTOE)	Aritma Çamuru Gazı (KTOE)	Tarımsal Atıklardan Elde Edilen Biyogaz (KTOE)	Toplam (KTOE)	Depo Gazı (KTOE)	Aritma Çamuru Gazı (KTOE)	Tarımsal Atıklardan Elde Edilen Biyogaz (KTOE)	Toplam (KTOE)
Almanya	383,2	270,2	1011,7	1665,3	416,4	270,2	1696,5	2383,1
İngiltere	1318,5	180,0	-	1498,5	1433,1	191,1	-	1624,2
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	329,9
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	77,6	48,1	18,0	12,5	78,6
Çek Cum.	24,5	31,1	7,8	63,4	29,4	32,1	17,0	78,5
Polonya	18,9	43,1	0,5	62,4	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	-	36,4	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	27,2	9,2	17,1	0,8	27,2
Macaristan	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	11,9
Lüksemburg	-	-	9,2	9,2	-	-	10,0	10,0
Slovakya	0,4	6,9	0,4	7,6	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	-	2,5
Kıbrıs	-	-	0,0	0,0	-	-	0,2	0,2

3.8.2. 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 [153].

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 [153]. %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 [41].



Şekil 3.13. Türkiye genel enerji tüketimi dağılımı [153].

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 kullanılabilecek başlıca atık türleri; belediye atıkları, orman, tarım ve hayvancılık atıkları olarak sınıflandırılabilir [41].

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 [153]. Tablo 3.17’de bölgesel bazda kullanılabilir tarımsal kaynaklı atık miktarları görülmektedir.

Tablo 3.17. Bölgesel bazda kullanılabilir tarımsal kaynaklı atık miktarları [153].

BÖLGE	KULLANILABİLİR ATIK (TON)					TOPLAM ISIL DEĞER
	TARLA ÜRÜNLERİ (TON)	ISIL DEĞERİ (PJ)	BAHÇE ÜRÜNLERİ (TON)	ISIL DEĞERİ (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 [153]. Herbir büyükbaş hayvandan 3,6 t/yıl, herbir küçükbaş hayvandan 0,7 t/yıl ve herbir kanatlı hayvandan 0,022 t/yıl yaş gübre olduğu 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 olduğu kabul edilerek, Türkiye’nin hayvansal atıklardan elde edebileceği biyogaz miktarı hesabı Tablo 3.18’de özetlenmiştir [154].

Tablo 3.18. Türkiye'nin hayvansal atık potansiyeline karşılık gelen biyogaz üretimi [155].

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

Yukarıda belirlenen Türkiye’nin biyogaz potansiyelinden, özellikle elektrik üretiminde faydalanılabilir. Türkiye’nin elektrik enerjisi toplam kurulu kapasitesi 2009 yılı Mayıs ayı itibariyle 42.248 MW olup, bunun yaklaşık % 0,16’lık 67 MW’lık kısmını biyogaz ve çöp gazı tesisleri oluşturmaktadır [156].

Türkiye'nin enerji ihtiyacının 2005-2025 yılları arasında 3 kat artacağı tahmin edilmektedir [157]. Toplam sera gazı emisyonları değerlendirildiğinde ise, fosil yakıtların kullanımı nedeniyle en çok emisyon üretiminin enerji sektöründe olduğu ve 2007 yılında 1990 yılına göre tespit edilen toplam emisyon miktarına göre % 119 oranında artış olduğu tespit edilmiştir [158].

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 [41].

3.9. Biyogazın Arıtılması – Biyometan

Biyogazın enerji seviyesinin yükseltilmesi (zenginleştirme), nakledilebilir hale getirilmesi ve taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilmesi için içinde enerji seyreltici olan, basınç altında depolama gücü oluşturarak ve nakil sistemlerinde korozyona neden olan maddelerden arındırılması gerekmektedir. Biyogazın depolama, kullanım ve nakliyesinde problemler oluşturan ana bileşenler H_2S , H_2O , CO_2 ve halojenlenmiş bileşiklerdir [159].

Hidrojen sülfür toksittir ve hoş olmayan çürük yumurta kokusu yayar. Hidrojen sülfür ile biyogazda bulunan su buharı bir araya geldiğinde sülfürik asit oluşur. Asitler biyogazın değerlendirilmesinde kullanılan motorlar ve bunun öncesinde ve sonrasında bulunan yapı parçalarına (gaz hattı, atık gaz hattı) zarar verirler. Biyogazda bulunan diğer maddelere veya kullanılan diğer teknolojilere (örneğin doğalgaz ikamesi olarak) bağlı olarak, daha geniş çerçevede bir gaz hazırlama sistemine gerek olabilir. Kombine ısı ve güç santrali üreticileri, asgari taleplerini kullanılan yanıcı gazların özelliklerine göre ayarlarlar. Bu, biyogazın kullanımı için de geçerlidir. Daha uzun bakım aralıkları ve motorların hasar görmesinin engellenmesi için yanıcı gazların özelliklerine uyulması gerekmektedir [160].

Ham biyogaz neme doygun bir haldedir. Çünkü ortamın sıcaklığı buharlaşmaya müsaittir ve oluşan gaz bu ortamı terk ederken beraberinde bir miktar nemi sürükleyip

götürdüğünden neme doygun halde bulunmaktadır. Biyogazın 35 °C'da nem içeriği yaklaşık % 5'dir. Nem içerisinde H₂S kolay çözündüğünden, yoğunlaşmış sıvı içindeki H₂S gaz haldeki H₂S'den daha koroziftir. Nemin yoğunlaşması gaz nakil işlemlerinde problem oluşturmaktadır. Biyogaz basınçla sıkıştırılmak istendiğinde içindeki nem gaz ventillerinde tıkanmalara neden olmaktadır. İçinde nem olan biyogaz yakıldığında vereceği enerji daha düşüktür. Saydığımız bu sebeplerden dolayı biyogazın nemden arındırılması gerekmektedir [159]. Biyogaz zenginleştirilirken bu işlemin hangi aşamasında nemin alınması gerektiği uygulanan zenginleştirme tekniğine bağlıdır. Yoğuşturma, metal oksitler üzerine adsorpsiyon, glikol veya suyu seven tuzlara absorpsiyon nem gideriminde en yaygın olarak uygulanan tekniklerdir [161].

Aslında biyogaz zenginleştirme denildiğinde kastedilen biyogazdan CO₂ giderimidir. Biyogaz içindeki CO₂ metandan sonra biyogazın en yüksek kesrini oluşturur. Bu nedenle CO₂ biyogazın enerji seviyesinin düşmesinden sorumludur. Dolayısıyla CO₂ enerji seyreltici olarak adlandırılır. Biyogazın doğal gaz veya otomobil yakıtı olarak kullanılabilmesi için içindeki CO₂ miktarının belli bir seviyenin altına düşürülmesi gerekmektedir [159].

Biyogaz, genel olarak % 40 – 70 CH₄, % 60 – 30 CO₂ ve H₂S, N₂, H₂, CO gibi diğer gazlardan oluşur [109]. Eğer besleme materyalinin tamamı hayvansal ve bitkisel yağlardan oluşmuyorsa, üretilen biyogazın CH₄ içeriğinin % 70'in üzerinde olması teorik olarak mümkün değildir. Bu değer üzerinde metan elde edilen sistemler, fermente malzemenin CO₂'yi absorblamasıyla oluşmaktadır [57]. Gerekli durumlarda istenmeyen gazların biyogaz içerisinden uzaklaştırılması ve CH₄ oranının artırılması için çeşitli arıtma yöntemleri kullanılır. Biyogazın arıtılmasında dört faktör rol oynamaktadır;

- Isıl değerini artırmak,
- Korozyonu önlemek,
- İnsan sağlığını korumak,
- Çevre kirliliğini azaltmak [162].

Biyogazın arıtımında üç bileşik göz önüne alınır. CO₂, H₂S ve su [163]. Biyogazın arıtılmasıyla elde edilen CH₄ oranı yüksek gaz, biyometan adı verilmektedir. Biyogazın arıtılmasıyla elde edilebilecek ürünler;

- Sıkıştırılmış biyometan,
- Fischer – Tropsch sentez prosesi ile benzin veya dizel yakıtların yerine kullanılabilen sıvı hidrokarbonlar,
- Metanol,
- Hidrojen,
- Sıvılaştırılmış biyometan [164].

Biyogazın taşıtlarda kullanımının yaygın olduğu İsveç'te, kullanılacak biyogaz için standartlar getirilmiştir. Buna göre CH₄ oranı minimum % 96, su buharı oranı maksimum 32 mg/Nm³, H₂S oranı maksimum 23 mg/Nm³ ve O₂ oranı maksimum % 1 olmalıdır. Aynı ülkede şehir içi otobüslerde 60.000 km için yapılan emisyon değerlendirmesinde, motorin ile çalışan otobüslere göre biyogazla çalışanların, NO_x (Azot Oksit) emisyonlarının % 60, CO emisyonlarının % 90, HC (Hidrokarbon) emisyonlarının % 80 ve parçaçık emisyonlarının % 60 daha az olduğu rapor edilmiştir. Çevrimsel olarak bakıldığında CO₂ emisyonu ise 0 olmaktadır [164]. Eğer biyogazda metan miktarı % 90'a çıkarılabilirse, % 25 biyogaz-% 75 doğal gaz karıştırılarak kullanılabilir. Arıtılmazsa, yaklaşık % 8 biyogaz-% 92 doğal gaz karışımı, kullanım için uygundur [165]. İçten yanmalı motorlarda biyogaz kullanıldığında, NO_x emisyonu azalmakta, hidrokarbonların emisyonu artmaktadır [166]. NO_x emisyonunun az olması biyogazın içerdiği CO₂'den kaynaklanmaktadır [85]. Ham biyogazın arıtılması yerine, fermentasyon sırasında biyolojik yöntemlerin kullanılmasıyla, üretilen biyogazın içerisindeki CH₄ yüzdesi artmaktadır. Yani fizikokimyasal yöntemlerdeki istenmeyen bileşiklerin giderilmesi yerine, oluşması engellenmektedir [163]. Kullanım alanına göre biyogaz içindeki metan harici kimyasalların sahip olması gereken değerler Tablo 3.19'deki gibidir.

Tablo 3.19. Kullanım alanına göre biyogaz içindeki metan harici kimyasalların sahip olması gereken değerler [167].

Gaz Kullanım Alanı	H₂S	CO₂	H₂O
Isıtma	<1000 ppm	Olabilir	Olabilir
Mutfak	Yok	Olabilir	Olabilir
Sabit Motor	<1.0 ppm	Olabilir	Yoğuşma Olmamalı
Taşıt	Yok	Giderilmeli	Yok
Doğalgaz Şebekesi	Yok	Yok	Yok

Biyogaz içinde eser miktarlarda yağ ve katı partiküller olabilmektedir. Uygun bir filtre kullanılarak bu partiküller biyogazdan giderilebilir [159]. İsveç standartlarına göre taşıt yakıtı olarak kullanılan biyogazın sahip olması gereken değerler Tablo 3.20'deki gibidir.

Tablo 3.20. İsveç standartlarına göre (SS 155438) taşıt yakıtı olarak kullanılan biyogazın sahip olması gereken değerler [168].

Bileşen	Kriter Değer
CH ₄ (Min)	% 96
O ₂ (Max)	% 1.0
CO ₂ +O ₂ +N ₂ (Max)	% 4.0
H ₂ O (Max)	32 mg/Nm ³
H ₂ S (Max)	23 mg/Nm ³
NH ₃ (Max)	20 mg/Nm ³
Partikül madde (Max Boyut)	5 µm

3.9.1. Desülfürizasyon (H₂S Giderimi)

Kullanılan organik maddeye göre miktarı değişmesine rağmen H₂S daima biyogaz içinde mevcuttur. H₂S anaerobik proses içerisinde bakteri gelişimini olumsuz etkilemektedir [161]. H₂S'in kaynağı besleme materyalinde bulunan proteinler ve sülfürlü bileşenlerdir [169]. Çok miktarda nitrat ve sülfat içeren atık maddeler anaerobik fermentasyon sırasında, metan evresinden önce azot ve H₂S üretirler [116]. Besleme

materyalinin içerdiği sülfat miktarına bağlı olarak biyogaz içerisinde 1500 – 5000 ppm yani % 0,15–0,5 veya 2,1–7 g H₂S/m³ bulunabilmektedir. H₂S fermente malzemede çözünmüş halde ve gaz halinde bulunur. Yüksek konsantrasyonlarda sistemin inhibe olmasına neden olur [170]. Bu yüzden H₂S miktarı fazla olduğunda ayrı bir kimyasal reaktörde H₂S giderimi daha uygun olmaktadır [171]. H₂S yanıcı ve zehirli bir gazdır. 0,05–500 ppm (Parts Per Million) gibi düşük konsantrasyonlarda dahi, oluşan çürük yumurta kokusuyla hissedilebilir. Suda çözündüğünde zayıf asit formuna dönüşür. Yanması sırasında oluşan SO₂ (Kükürt Dioksit), asit yağmurlarına neden olan yüksek derecede korozyonlu sülfürik asit oluşumuna neden olur. Havada % 0,1 oranında bulunması durumunda derhal, % 0,05 civarında bulunması durumunda 30 dakikada ölüme sebep olur [170]. H₂S'in mekan içinde izin verilebilecek sınır değeri 5–20 ppm'dir [57, 172]. H₂S korozyona ve kötü kokuya neden olur [75].

Hidrojen sülfür, içten yanmalı motorlarda korozyon ve aşınmaya sebep olurken yanma ürünlerinde sülfür dioksit oluşumuna neden olur. H₂S özellikle metal yüzeylerde aşınmaya sebep olur. Galvanizli parçalar da bu korozyona maruz kalır. Demir dışı malzemelerde, vanalarda, bağlantı elemanlarında, gaz sayaçlarında, basınç regülatörlerinde korozyona neden olur. Yanma ürünlerinde oluşan SO₂ nedeniyle, biyogazın yakıldığı sistemlerin bacalarında korozyon meydana gelir. İçten yanmalı motorlarda, düşük sıcaklık esnasında, özellikle durma ve kalkış zamanlarında sülfürik asit motor parçalarında yıpranmaya neden olur. Servis ömrü bu yüzden normalin % 10 - 15'i azalır. Ayrıca SO₂ motor yağında çözünerek asitliğini artırır ve yağlama özelliğinin kaybolmasına neden olur. Bu yüzden yağ değiştirme süresi yaklaşık 200 – 250 saate kadar düşer. Pişirme ve aydınlatma amaçlı kullanımlarda, cihazların bulunduğu odaların havalandırılması gereklidir [170].

H₂S birikmesi kapalı alanlarda göz tahrişine neden olabilmektedir. Biyogaz içerisinde H₂S bulunması, baca gazında SO₂ ve SO₃ emisyonuna neden olur [173]. Özellikle SO₂'den, korozyon etkisi yüksek olan H₂SO₃ (Sülfüroz Asit) oluşur [57]. İçten yanmalı motorlarda kullanımda, motor durdurulduğunda, içindeki biyogaz tamamen boşaltılmalıdır. Yoksa içerisinde bulunan H₂S çözünerek korozyona neden olur [70]. Biyogaz, H₂S miktarı 700–1500 ppm arasında olduğunda, içten yanmalı motorlarda önemli bir korozyona neden olmadan kullanılabilir [165]. Çoğu motor üreticileri H₂S için

1500 ppm yada % 0,15 (hacimsel) oranı, kabul edilebilen üst sınır olarak verirler [174]. Biyogazın arıtdıktan sonra doğal gaz hattına verilebilmesi için, H₂S miktarının 0,006 g/m³'e düşürülmesi gerekmektedir [72]. Yakıt hücresi uygulamalarında biyogaz kullanılacağı zaman, H₂S miktarı 4 ppm'in altında olmalıdır [175]. Tablo 3.21'de desülfürizasyon işlemi sürecinin genel özellikleri görülmektedir.

Desülfürizasyon işlemi esnasında 5 farklı yöntem kullanılır;

- Fermentörde biyolojik desülfürizasyon
- Harici reaktörlerde biyolojik desülfürizasyon – damlatmalı filtre yöntemi
- Biyokimyasal gaz yıkama – Biyo yıkayıcı
- Sülfadın çökeltilmesi (Dâhili Kimyasal Desülfürizasyon)
- Aktif karbon adsorpsiyonu [160].

Tablo 3.21. Desülfürizasyon işlemi sürecine genel bakış [176].

Yöntem	Enerji İhtiyacı		İşletim Maddeleri		Hava Girişi	Safılık ppmv olarak	Problemler
	El.	Term.	Tüketim	Atığa Çıkarma			
Fermentörde Biyo. Desülfürizasyon	++	o	++	++	Evet	50 – 2.000	Kesin Olmayan Proses Kontrolü
Harici Biyo. Desülfürizasyon	-	o	+	+	Evet	50 - 100	Kesin Olmayan Proses Kontrolü
Biyogaz Yıkayıcı	-	o	-	+	Hayır	50 - 100	Yüksek İşlem Maliyeti
Sülfür Çökelimi	o	o	--	o	Hayır	50 - 500	Ağır İşleyen Yöntem
Dahili Kimyasal Desülfürizasyon	o	o	--	--	Evet	1-100	Hızla Azalan Arındırma Etkisi
Aktif Karbon	o	o	--	-	Evet	< 5	Yüksek Atık Miktarları
++: Özellikle Avantajlı, +: Avantajlı, o: Nötr, -: Dezavantajlı, --: Özellikle Dezavantajlı							

3.9.1.1. Fermentörde Biyolojik Desülfürizasyon

Biyogaz içerisine yaklaşık olarak % 2–6 hava karıştırıldığında, yüzeyde bulunan bakteriler, H₂S'in oksitlenmesini gerçekleştirirler [57]. Sulfobacter oxydans bakterisi hidrojen sülfürü oksijen kullanmak suretiyle elementer kükürte dönüştürür, bu da fermentasyon artıklarıyla birlikte reaktörden dışarı atılır. Bakteri bunun için fermentörde yeterince bulunan besin maddelerine ihtiyaç duyar. Bu bakteriler her yerde bulundukları

için, ayrıca eklenmelerine gerek yoktur. Gereken oksijen örneğin çok küçük bir kompresörle (örneğin akvaryum kompresörü) içeri hava üflenmesi suretiyle fermentöre aktarılmış olur [160]. Ya da doğrudan gazometrenin içerisine bir miktar hava veya oksijen verilerek H_2S % 80–85 civarında azaltılabilir [174]. Hava ile birlikte oksijen verilirken dikkat etmek gerekmektedir, çünkü hava içindeki metan yüzdesi % 6-12 aralığında patlayıcıdır [159]. Fermentörde biyolojik desülfürizasyonun özellikleri Tablo 3.22’de belirtilmiştir.

Tablo 3.22. Fermentördeki biyolojik desülfürizasyonun referans değerleri ve uygulama parametreleri [160].

Referans Değerler	• Üretilen biyogaz miktarının % 3-6’sı oranında hava ilavesi
Uygunluk	• Üzerinde yeterli gaz bölmesi bulunan bütün fermentörler • Akabinde doğalgaz şebekesine besleme anlamlı değildir
Avantajları	- t Çok düşük maliyet - t Kimyasal kullanımına gerek kalmaz - t Bakım ve arıza gerektiren durumlar ortaya çıkarmayan teknoloji - t Kükürt fermentasyon artıklarına geri döner ve böylece gübre olarak kullanılabilir
Dezavantajlar	- Gerçekten serbest bırakılan hidrojen sülfür miktarı belli değildir - Hidrojen sülfür bozunması amaçlı optimasyon sağlanamaz - Oksijen ilavesi nedeniyle prosesin olumsuz etkilenmesi ve metan oksidasyonu ihtimali - Gaz bölmesindeki gece, gündüz ve yıllık sıcaklık dalgalanmaları, desülfürizasyon üzerinde olumsuz etki yaratabilir - Serbest bırakılan gaz miktarındaki dalgalanmalara müdahale edilemez - Fermentörde korozyon ve patlayıcı gaz karışımlarının oluşma tehlikesi - Doğalgaz kalitesinde hazırlanmaya uygun değil - Isıl değeri/ısıl değerinin düşmesi
Özel Durumlar	• Kükürt bakterileri için büyüme yüzeyleri bulunmalıdır veya ayrıca oluşturulmalıdır, çünkü mevcut yüzey genellikle desülfürizasyon için yeterli değildir. • Reaktöre yapılan oksijen beslemesinin düzenlemesiyle optimasyon ve kesintisiz hidrojen sülfür ölçümü mümkündür
Yapı Formları	• Gaz akışının manuel kumandası için düzenleme valfi ve akış göstergesi bulunan çok küçük kompresörler ya da akvaryum pompaları
Bakım	• Neredeyse hiç gerekli değil

Biyogazın içerdiği H_2S miktarına göre verilmesi gereken hava veya oksijen miktarları Tablo 3.23’te verilmiştir.

Tablo 3.23. İçerdiği H₂S miktarına göre biyogaza verilmesi gereken hava ve oksijen miktarları [174].

Biyogaz İçerisindeki H₂S Miktarı		Gerekli Oksijen Miktarı (%)	Gerekli Hava Miktarı (%)
ppm	% Hacim		
500	0,05	0,025	0,125
1000	0,10	0,050	0,250
1500	0,15	0,075	0,375
2000	0,20	0,100	0,500
2500	0,25	0,125	0,625
3000	0,30	0,150	0,750

3.9.1.2. Harici Reaktörlerde Biyolojik Desülfürizasyon – Damlatmalı Filtre Yöntemi

Fermentördeki biyolojik desülfürizasyon işleminde belirtilen dezavantajlardan kaçınabilmek için biyolojik desülfürizasyon fermentörün dışında, damlatmalı filtre olarak anılan bir yöntemle de yapılabilir. Bazı firmalar bu yöntem için ayrı kaplarda düzenlenmiş biyolojik desülfürizasyon filtreleri satmaktadırlar. Bu sayede desülfürizasyon için gereken hava ve oksijen beslemesi gibi çerçeve koşullarına daha kesin bir şekilde uyma imkânı bulunmaktadır. Fermente olmuş materyalin gübre etkisini yükseltmek için, proseste ortaya çıkan kükürt fermentasyon artığı deposundaki fermente olmuş materyale yeniden eklenebilir. Hidrojen sülfürün bir filtre yardımıyla absorbe edildiği (oksijen eklemek suretiyle çözeltinin rejenerasyonu) damlatmalı filtre yönteminde % 99'a kadar bozunma oranlarına ulaşılabilir, bu da 50 ppm (kükürt) altında bir atık gaz konsantrasyonlarına neden olabilir [177]. Yaklaşık % 6 oranında yüksek hava ilavesi nedeniyle bu yöntem biyometan hazırlanması için uygun değildir [178]. Harici reaktörlerde biyolojik desülfürizasyon sistemlerinin referans değerleri ve uygulama parametreleri Tablo 3.24'te görülmektedir.

Tablo 3.24. Harici biyolojik desülfürizasyon sistemlerinin referans değerleri ve uygulama parametreleri [160].

Referans Değerler	• % 99 oranının üstünde arındırma mümkün (örneğin 6.000 ppm'den < 50 ppm) • Teknik her boyuttan biyogaz tesisi için temin edilebilir
Uygunluk	• Bütün biyogaz üretim sistemleri • Kaba desülfürizasyon • Damlatmalı filtre sütunu gazın enterkonnekte sisteme beslenmesi için uygun değildir
Avantajları	- t Gerçekte serbest bırakılan hidrojen sülfür miktarına göre boyutlandırma mümkün - t Besin maddeleri, hava ilavesi ve ısı yönetimi ile hidrojen sülfür bozunmasının hedefli optimasyonu sağlanabilir - t Fermentöre oksijen girmesi nedeniyle proses olumsuz etkilenmez (çünkü hava ilavesi fermentörün dışında gerçekleşmektedir) - t Kimyasal kullanımına gerek kalmaz - t Kolaylıkla güçlendirilebilir teknoloji - t Yeterli boyutlandırmada gaz miktarındaki kısa süreli dalgalanmalar gaz kalitesi üzerinde negatif bir etki yaratmaz
Dezavantajlar	- Ek maliyet getiren ilave düzeneğe (Damlatmalı filtre sisteminde optimum ısı sınırları 28–32 °C) - Ek bakım ihtiyacı (besin maddesi hazırlanması) - Biyogaza çok fazla hava veren damlatmalı filtre sistemi
Özel Durumlar	• Harici desülfürizasyon sistemleri
Yapı Formları	• Plastikten veya çelikten yapılmış ve bağımsız inşa edilen, taşıyıcılarla dolu sütunlar, kazanlar veya konteynırlar, kısmen bir mikroorganizma emülsiyonu geri yıkamasıyla (damlatmalı filtre yöntemi)
Bakım	• Biyolojik mikroorganizma emülsiyonları büyük zaman aralıklarıyla tekrar doldurulmalı ya da taşıyıcılar uzun vadede değiştirilmelidir

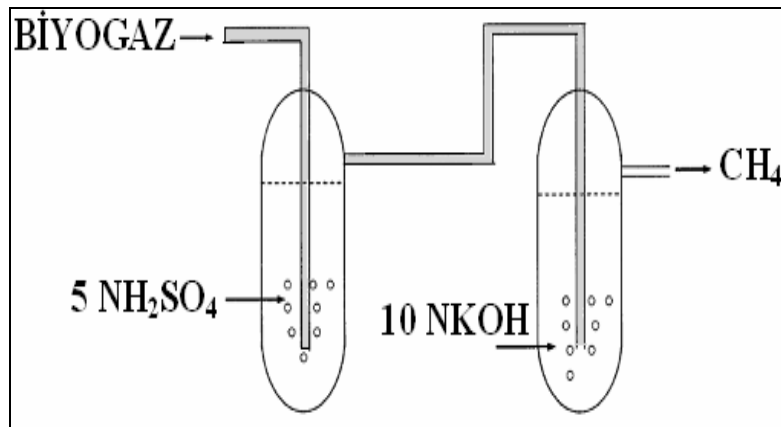
3.9.1.3. Biyokimyasal Gaz Yıkama – Biyo Yıkayıcı

Damlatmalı filtre yönteminin ve dâhili desülfürizasyonun aksine, biyo yıkayıcı biyogazın doğalgaz kalitesinde hazırlanabilmesi için kullanılabilecek tek biyolojik yöntemdir. İki basamaklı bu yöntem bir dolgulu kolondan (H_2S 'nin inceltilmiş bir potasyum oksit çözeltisiyle absorpsiyonu), bir biyoreaktör (yıkamış çözeltinin havadaki oksijenle rejenerasyonu) ve bir kükürt ayırıcısından (elementer kükürdün ayrılması) oluşur ve ayrı rejenerasyon ile biyogaza hava karışmasını engeller. Bu sayede her ne kadar bir damlatmalı filtre sistemindekine benzer çok yüksek sülfür yükleri elimine edilebilirse de (30.000 mg/m^3 'e kadar), bu teknoloji çok karmaşık aletler gerektirdiğinden sadece yüksek gaz üretimi ya da H_2S yükleri bulunan tesislerde kullanılabilir. Biyo yıkayıcının özellikleri Tablo 3.25'te gösterilmektedir [160].

Tablo 3.25. Harici biyokimyasal gaz yıkayıcılarının referans değerleri ve uygulama parametreleri [160].

Referans Değerler	• Kostik soda ve demir hidroksitle mümkündür • 10 ila 1.200 Nm³/h arasındaki gaz miktarları için sistemler mevcuttur • Ham gaz miktarı ile tesis büyüklüğü arasındaki uyuma bağlı olarak, % 95'in üstünde çok yüksek arındırma oranları mümkündür
Uygunluk	• Bütün biyogaz üretim sistemleri • Kaba desülfürizasyon
Avantajları	- t Gerçekte serbest bırakılan hidrojen sülfür miktarına göre boyutlandırma mümkün - t Besin maddesi, hava takviyesi ve ısı yönetimi ile hidrojen sülfür bozunmasının otomatikleştirilmiş Hedefe yönelik optimasyonu mümkündür - t Oksijen ilavesi nedeniyle proses zarar görmez - t Fermentörün gaz bölmesindeki yapı parçalarında güçlü korozyondan kaçınma (dahili biyolojik desülfürizasyona kıyasla)
Dezavantajlar	- Ek maliyet getiren ilave düzeneğe (kostik soda, taze su) - Kimyasal ihtiyacı ortaya çıkar - Kostik sodanın seyreltilmesi için taze su ilavesine ihtiyaç duyulur (demir hidroksitte değil) - Ek bakım maliyeti
Özel Durumlar	• Kullanılan sodanın arıtma tesislerinde arıtılması gerekir, ancak kimyasal açıdan sorunsuzdur (sadece kostik sodada) • Harici desülfürizasyon sistemleri
Yapı Formları	• Plastikten sütunlar veya kazanlar şeklinde, bağımsız inşa edilen, taşıyıcılarla dolu, sodanın geri yıkınmasıyla
Bakım	• Kimyasallar nispeten büyük zaman aralıklarıyla doldurulmalıdır • Demir hidroksit ortam havasının havalandırılmasıyla birçok kez rejenere edilebilir, ancak oluşan güçlü ısı tutuşmalara neden olabilir

Ayrıca saf metan elde edebilmek için, biyogazı yıkama H₂SO₄ ve KOH çözeltileride kullanılarak yapılabilmektedir. Bu işlem üretilen biyogazı belirli miktarlardaki 5N H₂SO₄ (Sülfürik Asit) ve 10N KOH (Potasyum Hidroksit) gibi asit çözeltilerden geçirilerek yapılmaktadır [179].



Şekil 3.14. Biyogazı yıkama yöntemi [180].

3.9.1.4. Sülfadın çökertilmesi

Kimyasal desülfürizasyonun bu yöntemi fermentörde gerçekleşir. Bu yöntem de biyolojik desülfürizasyon yöntemleri gibi kaba desülfürizasyona yarar (100 ila 150 ppm arasındaki H_2S değerlerine ulaşılabilir. Tablo 3.26’da belirtilen demir bağlantılarının fermentöre verilmesiyle birlikte, kükürt kimyasal olarak fermentasyon materyaline bağlanır, bu sayede de hidrojen sülfür olarak serbest bırakılması baskılanmış olur. Tablo 3.26’da belirtilen özellikler nedeniyle bu yöntem ilk etapta küçük biyogaz tesisleri, ya da düşük H_2S yükü (< 500 ppm) bulunan tesisler için uygundur [181].

Tablo 3.26. Dâhili kimyasal desülfürizasyonda referans değerler [182].

Referans Değerler	• Ayrışmada kullanılacak kimyasal maddeler demir tuzları (demir-III-klorür, demir-II-klorür, demir-(II)-sülfat) olabilir, demir hidroksit de uygundur • Her bir m^3 materyal için 33 g Fe eklenir [183].
Uygunluk	• Bütün yaş fermentasyon sistemleri • Kaba desülfürizasyon
Avantajları	- t Çok iyi ayrıştırma oranları - t Desülfürizasyon için ilave düzeneğe gerek yoktur - t İlave bakım maliyeti yoktur - t Giren materyal kütlesine göre dozajlama mümkündür - t Oksijen ilavesi nedeniyle proses zarar görmez - t Fermentörün gaz bölmesindeki yapı parçalarında güçlü korozyondan kaçınma (dahili biyolojik desülfürizasyona kıyasla) - t Gaz serbest kalış oranlarında ki (üretim) dalgalanmalar, biyogazda kalite kaybına neden olmaz - t Biyogazın gaz hatlarına beslenebilmesi için sonradan ince desülfürizasyon yapılmaya uygundur
Dezavantajlar	- Giriş materyalindeki kükürt oranına göre boyutlandırma zordur (genellikle fazla dozajlama gereklidir) - Sürekli kimyasal kullanımı nedeniyle cari giderlerin yükselmesi - Kapsamlı güvenlik düzenekleri nedeniyle yükselen yatırım maliyetleri
Özel Durumlar	• Fermentördeki kimyasal desülfürizasyon kısmen fermentörün gaz bölmesindeki biyolojik desülfürizasyon yeterli gelmediği zaman başlatılır • Açığa çıkan demir sülfid nedeniyle topraktaki demir konsantrasyonu hızla yükselebilir
Yapı Formları	• İlave küçük taşıma teknolojisiyle manuel veya otomatik dozajlama • Çözelti veya silindirik pelet ve tane şeklinde içeriye aktarma
Bakım	• Bakım gerektirmez ya da çok az gerektirir

3.9.1.5. Aktif Karbon Adsorbsiyonu

İnce desülfürizasyon yöntemi olarak kullanılan aktif karbon adsorbsiyonu, hidrojen sülfürün kullanılan aktif karbonun üst yüzeyindeki katalitik oksidasyonuna dayanır. İyileştirilmiş bir reaksiyon hızı ve yükleme kapasitelerinin artırılması için, aktif karbonun

su geçirmez hale getirilmesi veya dozajlanması mümkündür. Su geçirmez hale getirmek için potasyum iyodür ve kalsiyum karbonat kullanılabilir. Yeterli bir desülfürizasyonun koşulu, su buharı ve oksijenin mevcudiyetidir. Bundan ötürü su geçirmez hale getirilmiş aktif karbonlar, hava içermeyen gazlar için kullanılmaya uygun değildir. Kısa bir süre önce piyasaya çıkmış olan dozajlanmış aktif karbonlar (potasyum permanganat), hava içermeyen biyogazlar için de kullanılabilir. Mikro gözeneklerin blokajı söz konusu olmadığı için, burada da desülfürizasyon yeteneği artış göstermektedir [181]. Tablo 3.27’de aktif karbon ile desülfürizasyonda referans değerler gösterilmektedir.

Tablo 3.27. Aktif karbon ile desülfürizasyonda referans değerler [160].

Referans Değerler	• Su geçirmez hale getirilmiş (potasyum iyodür, kalsiyum karbonat) veya dozajlanmış (postayum permanganat) aktif karbonlar
Uygunluk	• Bütün biyogaz üretim sistemleri • 150 ila 300 ppm arasındaki yüklemelerde ince desülfürizasyon için
Avantajları	- t Çok iyi ayrıştırma oranları (< 4 ppm mümkündür [184].) - t Uygun yatırım maliyetleri - t Dozajlanmış aktif karbonda oksijen ilavesi nedeniyle proses zarara uğramaz - t Fermentörün gaz bölmesindeki yapı parçalarında güçlü korozyondan kaçınma (dahili biyolojik desülfürizasyona kıyasla) - t Yöntem biyogazın gaz hatlarına beslenmesine uygundur
Dezavantajlar	- Oksijen ve su buharı içermeyen biyogazlar için uygun değildir (istisna: Su geçirmez hale getirilmiş aktif karbonlar) - Zor rejenerasyon nedeniyle yüksek işletme maliyetleri (450 °C üzerindeki ısılarda buhar [185].) - Aktif karbonun atığa çıkartılması - Ayrıştırılan kükürtün kullanımı mümkün değildir
Özel Durumlar	• Aktif karbon ile desülfürizasyon, özellikle kükürtüz gazlar istenildiği takdirde gerçekleştirilir
Yapı Formları	• Plastikten veya çelikten sütunlar şeklinde, bağımsız duran, aktif karbonla dolu
Bakım	• Aktif karbonun düzenli olarak değiştirilmesi gerekir

3.9.2. Karbondioksit ayrışması

Karbondioksit ayrıştırması, ilk etapta gazın şebeke beslemesi için kullanılması durumunda gereklidir. Metan oranının yükseltilmesiyle birlikte, yanma özelliklerinin talep edilen değerlere uyumlaştırılması mümkün olur. Biyogazın doğalgaz şebekesine verilmesi için Avrupa ülkelerinde CO₂ ayrıştırması için ağırlıklı olarak kimyasal yıkama yapılan basınçlı suyla yıkama ve basınç değişimli adsorbsiyon yöntemi kullanılmaktadır. Uygulanacak yöntemin seçimi için belirleyici olan gazın özellikleri, ulaşılabilir gaz kalitesi, metan kalitesi ve son olarak da yerel özelliklere göre değişiklik gösterebilecek

hazırlama maliyetleridir [160]. Tablo 3.28’de hazırlama işleminin belli başlı özellikleri açıklanmıştır.

CO₂ içeriği, su buharıyla birlikte zayıf asit oluşturur ve korozyona neden olur. Ayrıca sıkıştırma sırasında kompresör içinde kuru buz oluşumuna neden olur [72]. Biyogaz reaktörlerinde CO₂ miktarı, kullanılan materyale, bekletme süresine, pH ve sıcaklık seviyesine, reaktör çalışma basıncına, reaktör geometrisine ve tipine bağlı olarak değişmektedir. Yakma sistemlerinde CO₂ artımına gerek olmamaktadır [186].

Tablo 3.28. Metan zenginleştirme yöntemlerinin karşılaştırılması [178,181].

Yöntem	Etki Prensipleri / Referans Özellikler	Ulaşılabilir CH ₄ Oranı	Diğerleri
Basınç Değişikliği Adsorpsiyonu (PSA)	Basınç değişikliği ile değişken fiziksel Adsorpsiyon ve desorpsiyon	> % 97	Çok sayıda gerçekleştirilmiş proje, önceden desülfürizasyon ve kurutma gerekli, düşük tesis düzenlenebilirliği, Yüksek elektrik ihtiyacı, ısı ihtiyacı yok, yüksek metan kaybı, proses kimyasalı yok
Basıncılı Suyu Yıkama (DWW)	Çözücü olarak suyla Çözücü olarak suyla; Basıncın düşürülmesiyle rejenerasyon	> % 98	Gerçekleştirilmiş birçok proje, önceden desülfürizasyon ve kurutma gerekmez, gaz debisine esnek uyum, yüksek elektrik ihtiyacı, Isı gerektirmez, yüksek metan kaçağı, proses kimyasalları gerektirmez
Amin Yıkama	Soda kullanılarak kimyasal adsorpsiyon (Amin), H ₂ O buharı ile rejenerasyon	> % 99	Gerçekleştirilen birkaç proje, küçük gaz debileri için, düşük elektrik ihtiyacı (basıncısız yöntem), çok yüksek ısı ihtiyacı, asgari metan kaçağı, yüksek yıkama maddesi ihtiyacı
Genosorb Yıkama	Genosorb DWW ile aynı (ya da. Selexol) çözücü olarak	> % 96	Az sayıda gerçekleştirilen proje, ekonomik olarak tavsiye edilir, desülfürizasyon ve kurutma gerekmez, esnek uyumlulaşma, çok düşük elektrik ihtiyacı, düşük ısı ihtiyacı, yüksek metan kaçağı
Membran Ayırma İşlemi	Gözenekli membranda gaz ayırımı için basınç düşüşü onun dışında gazların difüzyon hızı	> % 96	Az sayıda gerçekleştirilen proje, desülfürizasyon ve kurutma gerekmez, çok yüksek elektrik ihtiyacı, ısı ihtiyacı yok, yüksek metan kaçağı, proses kimyasalına gerek duymaz
Cyrogen İşlemi	Rektifikasyon yoluyla gaz sıvılaştırma, çok düşük sıcaklıklarda ayırma	> % 98	Pilot tesis statüsü, önceden desülfürizasyon gerekli, çok yüksek elektrik ihtiyacı, çok düşük metan kaçağı, proses kimyasalına gerek duymaz

3.9.2.1. Basınç Değişimli Adsorbsiyon (PSA)

Fiziksel gaz ayrıştırması için aktif karbon, moleküler eleklerin (zeolit) ve karbon moleküler eleklerin kullanılması basınç değişimli adsorbsiyon olarak anlaşılmaktadır [160]. Adsorbsiyon işleminde karışım içindeki gazlardan biri veya bir kaç fiziksel veya Vander Wall kuvveti ile katı adsorbent üzerine tutunur. Uygun adsorbent seçimi ile biyogaz içindeki CO_2 , H_2S , nem ve diğer kirleticiler seçici veya eş zamanlı olarak giderilirler. Adsorbent olarak silika, alumina, aktif karbon veya moleküler elek olarak da bilinen silikatlar (zeolitler) kullanılır [159].

Asıl olarak basınç altında da adsorbsiyon gerçekleştirilir. Gaz basınç altında adsorbent üzerine tutturulur ve adsorbent doygunluğa eriştikten sonra basınç kaldırılarak adsorblanmış olan gaz serbest bırakılır veya rejenerasyon gerçekleştirilir. Biyogazdan CO_2 'i gidermek için basınçlı adsorbsiyon uygulanmak istendiğinde bu işlemde önce H_2S ve nem giderilmelidir. Çünkü bu gazlar adsorbent rejenerasyonu için basınç kaldırıldığında CO_2 gibi kolaylıkla adsorbenti terk etmezler [159].

PSA (Pressure Swing Adsorption) yöntemi teknolojinin son seviyesidir ve çok sık uygulanmaktadır. Adsorbsiyonun dört döngüsünün süresine göre (yani 6 ila 10 bar arasında basınç için H_2O buharı ve CO_2 alınması), desorbsiyon (basınç azalması), boşaltma (yani ham veya ürün gazıyla yıkama ile yeniden desorbsiyon) ve basınç yükseltilmesi için biyogaz hazırlama tesislerinde dört ila altı adsorber aynı anda çalışmaktadır. Bu tesis konfigürasyonunda yaklaşık % 97 saflıkta (hacmen) CH_4 elde edilir. Ham ve/veya ürün gazıyla yeni yıkama döngülerinin başlatılması ve atık gazın yoğunlaştırıcıya kısmen geri döndürülmesi, metan üretiminin maliyetinin artmasına neden olur. Maliyetlerin artmasına karşın adsorbanların kullanım süreleri usulüne uygun çalıştırmada neredeyse sınırsızdır, ancak yine de bunun için kükürtsüz ve kurutulmuş bir ham gaza ihtiyaç duyulur. Aksi takdirde su, hidrojen sülfür ve diğer muhtemel minör bileşenler karbon moleküler eleklerinin üzerine emilecek, buda PSA ayırım gücünün kalıcı bir şekilde zarar görmesine, hatta durmasına neden olacaktır. Toplam enerji ihtiyacı diğer yöntemlere göre daha düşüktür, ancak elektrik ihtiyacı sürekli basınç değişimi nedeniyle görece daha yüksek bir konumdadır. Bu yöntemin daha küçük kapasiteler için uygun olması da bir avantajdır. PSA'nın dezavantajı halen atık hava içinde bulunan görece yüksek metan kaybıdır

(yaklaşık olarak % 1-5). Bu kayıp metan yüksek sera gazı etkisi nedeniyle sonradan okside edilmelidir [160].

3.9.2.2. Basıncılı Suyla Yıkama (DWW)

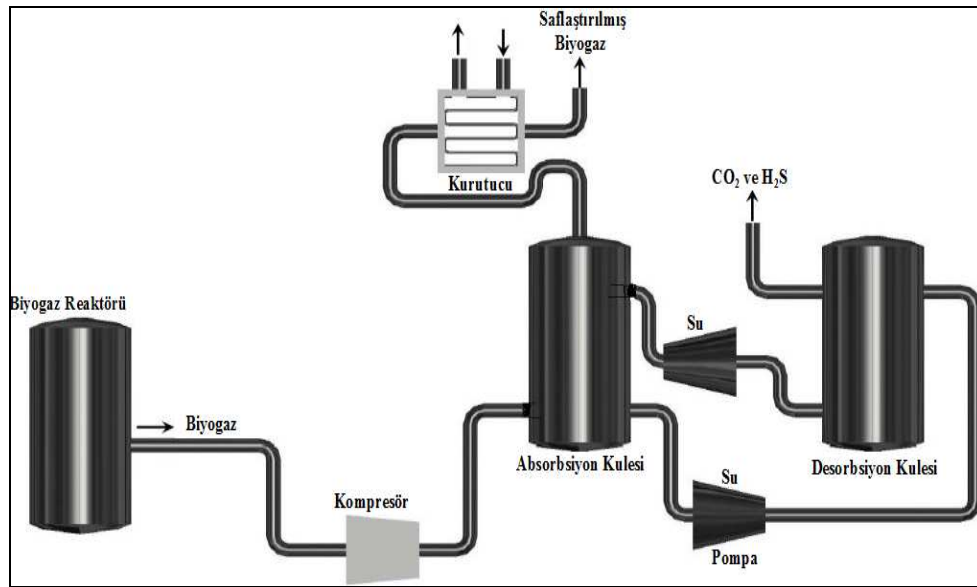
Biyogaz içindeki CO₂, H₂S ve NH₃ bu gazların basıncılı su içine fiziksel absorpsiyonla giderilebilirler. Bu esnada bir miktar metan da su içinde çözünür; fakat metanın su içindeki çözünürlüğü düşük olduğundan kayıp az olur [159]. Basıncılı suyla yıkama biyogaz için Avrupa’da en fazla uygulanan hazırlama yöntemidir (bütün tesislerin yaklaşık % 50’si). Bu yöntem CH₄ ile CO₂’nin sudaki değişik çözünürlüklerini kullanır. Önceden arındırılmış biyogazın basıncı (yani fermentörden taşınmış muhtemel su damlacıklarının veya çakıl dolguda nemin ayrıştırılması) ilk olarak yaklaşık 3 bara, sonra da bir kompresör basamağıyla yaklaşık 9 bara yükseltilir, ardından da H₂O ile hazırlanmış absorpsiyon sütununa (damlama yataklı reaktör) karşı akım olarak aktarılır. Hidrojen sülfür, karbondioksit, amonyak ile ham gazda bulunması muhtemel tozlar ve mikroorganizmalar, sütunun içinde bulunan suda çözünür. Bu maddeler daha sonra suyun geriliminin düşürülmesiyle sistemden atılır. Bu yöntemde önceden bir desülfürizasyon veya kurutma gerekli değildir. Şekil 3.15’te büyük oranda CO₂’in arındırıldığı biyogaz saflaştırma ünitesi görülmektedir. Bu yöntemin bir başka avantajı, sahip olduğu yüksek esnekliktir. Ham gazın içerdiği CO₂ oranına göre basınç ve ısı, aynı zamanda tesis üretim miktarına göre (mevcut kapasitenin % 40 ila 100’ü ayarlanabilir) düzenlenebilmektedir [178]. Tablo 3.29’da farklı gazların sudaki çözünürlükleri verilmiştir.

Tablo 3.29. Bazı gazların 20 °C ve 1 Atm basınçta sudaki çözünürlüğü [161].

Gaz	Sudaki Çözünürlüğü (cm ³ /kgsu)	Kaynama Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı (°C)	Kritik Sıcaklık (°C)	Kritik Basınç (bar)
CH ₄	3,3	-161,5	-182,5	-82,1	46,4
CO ₂	85,1	-78	-57	31	73,8
N ₂	1,5	-196	-210	-146,9	34
O ₂	3,0	-183	-219	-118,6	50,4
H ₂ S	25,0	100	0	374	221
H ₂	1,8	-62	-83	100,4	90,1

Tam otomatik işletme, kolay bakım, neme doymuş gazın hazırlanma imkânı (akabinde yapılacak kurutmayla), uygulamayla kanıtlanmış güvenilirlik, H_2S ve NH_3 'ün birlikte absorpsiyonu ve suyun absorpsiyonu (sınırsız yararlanabilirlik, tehlikesiz, maliyet) birer artı nokta olarak değerlendirilebilir [178].

Basıncı su içine CO_2 , H_2S ve NH_3 absorblayarak biyogazın temizlenmesi sistemin basit ve düşük maliyetli olması nedeniyle en fazla uygulanan yöntemdir [187]. Bu yöntemle temizlenen gaz su ile doygun halde olacağından basınçlandırmadan veya gaz nakil hattına verilmeden önce kurutulmalıdır [159]. Yöntemin dezavantajı yüksek elektrik sarfiyatı, ayrıca nispeten yüksek ve ardından oksidasyonu getiren metan kaçağıdır (yaklaşık olarak % 1) [160].



Şekil 3.15. Biyogaz saflaştırma ünitesi

3.9.2.3. Kimyasal yıkama (Amin)

Amin yıkama, biyogazın basınçsız olarak bir sıvıyla temas ettirilmesi, bu esnada da karbondioksitin yıkama maddesine geçmesine dayanan kimyasal bir absorpsiyonu işlemidir. Yıkama maddeleri olarak CO_2 ayrışımı için sıklıkla MEA (Mono Ethanolamin) (düşük basınç yönteminde ve sadece CO_2 yıkanacaksa) veya DEA (Di Ethanolamin) (yüksek basınç yönteminde ve rejenerasyon olmadan) kullanılır. CO_2 ve H_2S ayrışımı için MDEA (Methyl Di Ethanolamin) veya TEA (Tri Ethanolamin) kullanılır [178]. Yıkama

maddesinin yeniden üretimi için absorpsiyon basamağı bir rejenerasyon basamağından sonra başlatılır, bu esnada genellikle su buharı kullanılır. Bundan ötürü de yüksek bir termik enerji ihtiyacı ortaya çıkar, bu da bu yöntemin büyük dezavantajını teşkil eder. Dolayısıyla başarılı ısı konseptleri, bu teknolojinin en büyük optimizasyon potansiyelidir. Ayrıca yetersiz rejenerasyon nedeniyle sürekli bir çözücü madde tüketimi de bir başka dezavantajdır. Buna karşın amin yıkama çok yüksek ürün gaz kalitesine ($> \% 99$) çok düşük bir metan kaçağı ($< \% 0,1$) ile ulaşabilmek gibi bir avantaja sahiptir. Bu yöntem geçmişte Avrupa’da sadece münferit olarak uygulanırken, artık özellikle amin yıkamaya sahip hazırlama tesislerinin sayısı giderek artmaktadır. Amin yıkama özellikle küçük gaz debileri ve düşük maliyetli ısı kaynakları bulunan yerlerde kullanılmaktadır [160].

Amin ile yıkama işlemi kısaca özetlenecek olursa; Kimyasal absorpsiyonda biyogaz içindeki CO_2 ve H_2S ile kullanılan kimyasal arasında kimyasal bir bağ oluşur. Bu bağ kırarak absorbenti geri kazanmak oldukça yüksek enerji harcamayı gerektiren bir işlemdir. Biyogaz içindeki CO_2 ve H_2S asidik gazlar oldukları için bunların absorpsiyonunda rejenere edilebilen bazik kimyasallardan aminler (mono, di ve triethanolamin) veya sodyum, potasyum ve kalsiyum hidroksit in sulu çözeltileri kullanılır. Bu kimyasallar ile metan arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmez ve onların çözeltileri içlerinde de metanın çözünürlüğü oldukça düşüktür [161, 187].

3.9.2.4. Fiziksel yıkama (Seleksol, Genosorb)

Basıncılı suyla yıkama yönteminin işleyiş prensibine benzeyen genosorb yöntemi, esasen geliştirilmiş bir seleksol yöntemine dayanmaktadır. Burada su yerine bir yıkama çözeltilisi (genosorb) 7 bar basınçta biyogazla temas ettirilir, bu esnada karbondioksit ve hidrojen sülfür suda da ayrıştırılabilir. Bu sayede Genosorb yıkama her üç inhibitörü tek uygulama adımında ayrıştırabilen tek işlemdir. Ancak ekonomik sebeplerden ötürü desülfürizasyonu ve kurutulması tamamlanmış biyogaz kullanılmalıdır. Yıkama çözeltilisinin rejenerasyonu $50\text{ }^\circ\text{C}$ ’de gerilimin adım adım azaltılması ve ardından ortam havasıyla yıkanması ile gerçekleştirilir [160]. Burada gereken ısı gaz kompresöründen atık ısı kuplajı yardımıyla sağlanabilir [181]. Metan kaçağı olarak üreticiden $\% 1$ ila 2 oranları verilmektedir, bunlar da (kaçak metan) akabinde termik bir oksidasyon basamağı ile

işlenmelidir. Enerji açısından bu yöntem basınçlı suyla yıkamaya ve basınç değişimli adsorbsiyon yöntemine göre biraz daha yüksek bir enerji ihtiyacına sahiptir [160].

3.9.2.5. Membran yöntemi

Membran tekniği biyogaz alanında görece yeni bir yöntemdir ve henüz geliştirme aşamasında bulunmaktadır. Yine de münferit bazı membran ayrıştırma yöntemleri kullanılmaktadır. Yöntem, metan ile diğer gaz bileşenlerinin farklı büyüklükteki gaz moleküllerinin farklı büyüklükteki difüzyon hızları tarafından ayrıştırılmasına dayanır. Nispeten küçük bir molekül olan metan, membranların birçoğunun içinden örneğin karbondioksit veya hidrojen sülfürden daha fazla geçer [160]. Membran gaz ayrımı gazların molekül hacimleri ve şekilleri ve membran materyali ile olan etkileşimleri arasındaki farklılıklardan dolayı membranın bir tarafından diğerine farklı hızlarda geçerler. Transfer hızları arasındaki farklılıklar ise gaz moleküllerinin birbirinden ayrılmasını sağlar. Bir gazın membrandan doğru transferinde itici güç o gazın membranın iki yüzü arasındaki kısmi basınç veya konsantrasyon farkıdır [159]. Bu esnada gazın saflığı membran türü, membran yüzeyi, akım hızı ve ayırma basamaklarının sayısı tarafından ayarlanabilir [160].

Biyogazın yakıt kalitesinin yükseltilmesinde membran gaz ayırma teknolojisi pratikte çok fazla uygulanan bir teknoloji değildir. Fakat farklı bileşimde birçok membran materyali biyogazdan CO₂ ve H₂S'in ayrıştırılması için test edilmiştir [188-190,191,192,193]. Bu araştırma çalışmaları neticesinde biyogazın metan içeriği membran kullanılarak % 80 [188], % 97 [190] ve %94 değerlerine yükseltilebilmiştir [192].

3.9.2.6 Cryogen ayırma

Cryogen gaz hazırlama (yani CH₄ ile CO₂'nin düşük ısılarda ayrıştırılması) bir yandan sıvı CO₂ oluşan rektifikasyonu (gaz sıvılaştırma), öte yandan da CO₂'nin donmasını sağlayan düşük ısı ayrıştırmasını kapsar [178]. Bunların her ikisi de teknik olarak çok zor yöntemlerdir, çünkü gazın önceden desülfürizasyonunu ve kurutulmasını gerektirirler. Özellikle biyogaz uygulamaları bağlamında henüz pratikte sınanmamışlardır. Bu yöntemde her şeyden önce yüksek enerji ihtiyacı bir sorun olarak öne çıkmaktadır.

Ulaşılan gaz Ulaşılan gaz kaliteleri ($> \% 99$) ve düşük metan kaybı ($< \% 0,1$) yöntemin geliştirilmesinin önünü açmaktadır [160].

3.9.3. Kurutma

Gaz değerlendirme düzeneklerini yüksek aşınmadan ve tahribattan korumak, ya da müteakiben gelecek olan arındırma basamaklarının taleplerini karşılamak için su buharı biyogazdan ayrılmalıdır. Biyogazın alabileceği su veya su buharı miktarı, gazın ısisına bağlıdır. Biyogazın oransal nemliliği fermentörde $\% 100$ 'dür, yani biyogaz bu şekilde su buharına doymuştur. Biyogazın kurutulması için yoğunlaştırarak kurutma, adsorbsiyonlu kurutma (silika jeli, aktif karbon), ayrıca absorbsiyonlu kurutma (glikol yıkama) kullanılabilir [160].

3.9.3.1. Yoğunlaştırarak Kurutma

Bu yöntemin işleyiş ilkesi, biyogazın yoğuşma noktasının altına düşecek şekilde soğutulmasıyla yoğuşma suyunun ayrıştırılmasıdır. Biyogazın soğutulması genellikle gaz hattında gerçekleştirilir. Gaz hattının döşenmesi esnasında, yoğuşma, gaz hattının en derin noktasına monte edilen bir ayrıştırıcıda gerçekleşir. Gaz hattı yer altından geçiriliyorsa, bu durumda soğutma etkisi daha güçlüdür. Biyogazın soğutulmasında ön koşul, gaz hattının soğutma işlemine yeter uzunluğa sahip olmasıdır. Su buharının yanı sıra suda çözünen gazlar ve aerosol gibi istenmeyen bir dizi içerik maddeleri de biyogazdan ayrılır. Nem ayrıştırıcılar düzenli olarak boşaltılmalı, bu yüzden de kolay erişilebilir olmalıdırlar. Nem ayrıştırıcının donması, donmaya dayanıklı bir yapı tarzıyla mutlaka engellenmelidir. İlave soğukluk, soğuk suyun ısisının aktarılmasıyla elde edilir [160].

Yoğunlaştırarak kurutma yönteminde $3-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altında yoğuşma noktalarına ulaşılır, bu sayede de su buharı oranı $\% 0,15$ Hac. (Çıkış miktarı: $\% 3,1$ Hac., $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, yükleme oranı) kadar düşer. Önceden yapılacak bir kompresyon bu etkiyi daha da güçlendirebilir. Bu yöntem sonrasında gazın yakılmasıyla birlikte ulaşılan son tekniktir. Gaz hatlarına gaz beslemesinin taleplerine ancak koşullu olarak karşılık verir. Ancak sonradan uygulanacak olan arındırma yöntemleri (basınç değişikliği adsorbsiyonu, adsorbsiyona dayanan desülfürizasyon yöntemi) bu durumun düzelmesine yardım

edebilirler [181]. Yoğunlaştırarak kurutma bütün hacimsel akımlar için uygulanabilir [160]. Biyogazın soğutularak su buharının yoğunlaştırılmasında, soğutucuya harcanan enerji, elde edilen biyogazın enerji içeriğinin yaklaşık olarak % 2'sidir [57].

3.9.3.2. Adsorbsiyon Kurutması

Zeolit, silika jeli veya alüminyum oksid tabanlı çalışan adsorbsiyon yöntemlerinde çok daha iyi kurutma sonuçları elde edilebilir. Bunlarda -90 °C'ye kadar yoğuşma noktaları mümkündür [194]. Sabit bir yatağa monte edilmiş olan adsorberler karşılıklı olarak ortam basıncında ve 6-10 bar'da işletilirler ve küçük ve orta debilerde uygundur [181]. Adsorbe edilmiş materyalin rejenerasyonu, soğuk ya da sıcak rejenerasyon olarak gerçekleştirilir. Ulaşılabılır sonuçları nedeniyle bu yöntem bütün kullanım opsiyonlarına uygundur [160].

3.9.3.3. Absorbsiyon Kurutması

Absorptif ve buna bağlı olarak fiziksel bir yöntem olan, aslında doğalgaz hazırlanmasından kaynaklanan glikoz yıkama, biyogazı absorblayıcı bir sütunda karşı akımla glikol veya trietilen glikola taşıyan bir yöntemdir. Bu esnada hem su buharı, hem de daha yüksek hidrokarbonlar ham biyogazdan ayrıştırılabilir. Rejenerasyon ise glikol yıkaması tarafından ve yıkama çözeltisinin 200 °C'ye kadar ısıtılmasıyla gerçekleşir, bu esnada inhibitörlerin buharlaşması gerçekleşir [195]. Ulaşılabılır yoğuşma noktaları olarak literatürde 100 °C verilmektedir [196]. Bu yöntem ekonomik nedenlerden ötürü yüksek debili akımlara (500 m³/h) uygundur [178].

3.9.4. Diğer Eser Gazların Ayrılması

Biyogazdaki eser gazların arasında amonyak, siloksan ve BTX (benzol, toluol, xylol) ve benzerleri de bulunmaktadır. Ancak tarımsal biyogaz tesislerinde bu maddelerin sıklıkla ortaya çıktığını söylemek çok doğru olmaz. Varlıkları genellikle sınır değerlerin altında kalmakta, hatta bazı ender durumlarda tespit bile edilememektedir [181]. Bunun nedeni, bu maddelerin daha önce açıklanmış olan desülfürizasyon, kurutma ve metan zenginleştirme gibi saflaştırma yöntemleriyle de ayrılabilir olmalarıdır [160].

3.10. Biyogaz Kullanım ve Uygulama Alanları

Biyogazın üretiminin temel amacı çevreye zarar vermeden ısı ve elektrik enerjisi üretimidir. Ancak bunun kadar önemli bir diğer amacı da organik atıkların kontrollü koşullarda depolanmasının sağlanması, arıtma etkisinin bulunması, organik atıklardan kaynaklanan koku sorununu büyük ölçüde çözmesi ve tarımda organik gübre kullanımını kolaylaştırmasıdır [197].

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;

- 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 [71].

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 kullanılabilecek 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 [198].

Biyogazın motorlu taşıtlarda kullanılması ve doğalgaz hatlarına verilebilmesi için içerisindeki H_2S 'in birkaç ppm mertebelerine düşürülmesi ve buna ek olarak CO_2 'nin de ayrıştırılarak metan oranının %97'lere yükseltilmesi gerekir. Bu işlem biyogazın

saflaştırılması, metanca zenginleştirilmesi ya da biyometan oluşumu olarak adlandırılır. [82,199-201].

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 [201].

Saflaştırılarak metan oranı yükseltile ve H_2S '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 , CO_2 emisyonları ve partikül miktarı azalmaktadır [199].

Tek bir sistemden eş zamanlı olarak elektrik ve/veya mekanik güç ile kullanılabilir ısı üretilmesi 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 [202].

Biyogazın evsel amaçla kullanımında verim % 80'e ulaşmaktadır. Bu amaçla AB ülkelerinde geliştirilmiş birçok sistem bulunmaktadır. Günümüzde biyogaz büyük oranda elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Gaz motorunun soğutma suyu üreticinin ısıtılması için kullanılarak sistemin enerji bilançosu iyileştirilmektedir. Özellikle F.Almanya, Danimarka, Hollanda, İsveç ve benzeri ülkelerde yaygındır. Biyogazın elektrik üretiminde genelde izlenen iki yöntem bulunmaktadır. Birincisinde işletmenin gereksinim duyduğu miktarda enerji üretilmektedir. Bu sistemde gazın depolanabileceği yeterli büyüklükte deponun bulunması gerekir. İkinci sistemde ise üretilen tüm biyogaz elektrik enerjisi için kullanılır. İşletmenin ihtiyacı dışında kalan elektrik enerjisi satılır. Biyogaz doğrudan yakılarak, sıcak su ve sıcak hava elde etmede, kurutmada, buhar elde ederek ısı ve güç üretiminde kullanılabilir. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılarak, mekanik iş ve elektrik elde edilebilir [203]. Diğer bir kullanım alanı ise absorpsiyonlu ısıtma ve soğutmadır. Gaz türbinlerinde kullanım ise içerdiği su buharının ve diğer kalıntı gazların tamamen giderilmesini gerektirmektedir [204].

Özellikle elektrik bulunmayan kırsal kesimlere sahip ülkelerde, küçük ölçekli çiftliklerde biyogaz doğrudan yakılarak aydınlatma amaçlı olarak da kullanılabilir [205]. Biyogazın kurutmada ve özellikle kuluçka makinasında kullanımı durumunda sistem yatırımının geri ödeme süresi düşmektedir [206]. Elde edilen fermente gübre sistemde önem taşıdığına, bu atığın kurutulması veya sterilize edilmesi için biyogazın kullanılması ekonomik olmaktadır [115].

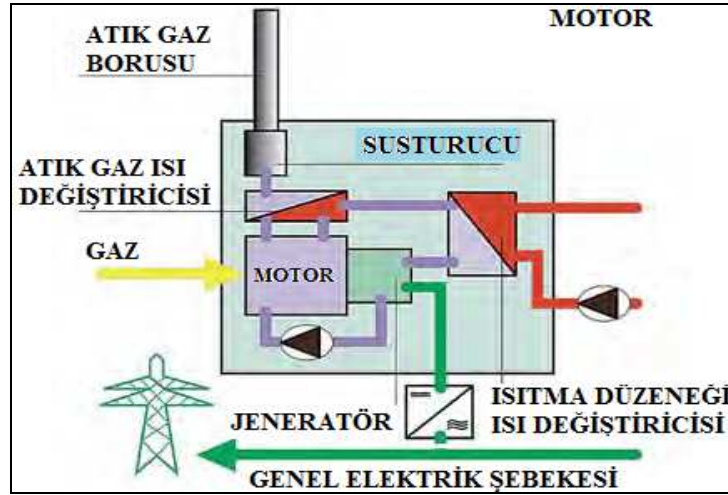
Biyogazın, LPG ve doğal gazla çalışan cihazlarda kullanılabilmesi için çeşitli modifikasyonlar gereklidir. Primer hava girişinin ve yanma hızının ayarlanması bunlardan biridir. Biyogaz, doğal gaz ya da LPG ile çalışan cihazlarda kullanıldığında, meme çapı büyütülmeli, hava giriş portu küçültülmelidir. Meme çapı, doğal gazla çalışanlara göre yaklaşık 1,3 kat artırılmalıdır [207]. Primer havanın düşmesiyle alev stabil hale gelir. Ayrıca brülörün başına bir metal elek eklenerek, alevin çarpma etkisi artırılır ve daha verimli yanma sağlanır [206].

Biyogazın yanması için litre başına 5,1 l hava gerekirken bu propan için 23,8 l butan için 30,9 l olmaktadır [207]. Biyogaz genellikle büyük alev jeti ve düşük yanma hızında kullanılır. Gerekli basınç bu durumda 10-15 mbar civarındadır. Uygun yanma hızı genellikle 0,25 –0,34 m/s olarak verilmektedir. Biyogazın içerisindeki CO₂ gazı, yanma ve alev yayılma hızını düşürür [75,204,208-210]. Biyogazı doğrudan yakan kazanlarda 1000 ppm'e kadar H₂S kabul edilebilir. Kazanlarda kullanım sırasında, biyogaz içerisinde bulunan nemin giderilmesi, gaz memelerinde oluşacak problemlerin engellenmesini sağlar. Bu giderim sırasında, H₂S'in büyük oranda giderilmesi de sağlanmış olur [60]. Biyogazla çalışan cihazların, yoğunmayı ve sülfürik asit oluşumunu önleyecek sıcaklıklarda çalıştırılması gerekmektedir [211].

3.10.1. Biyogazın Güç-Isı Kuplajıyla Kullanımı

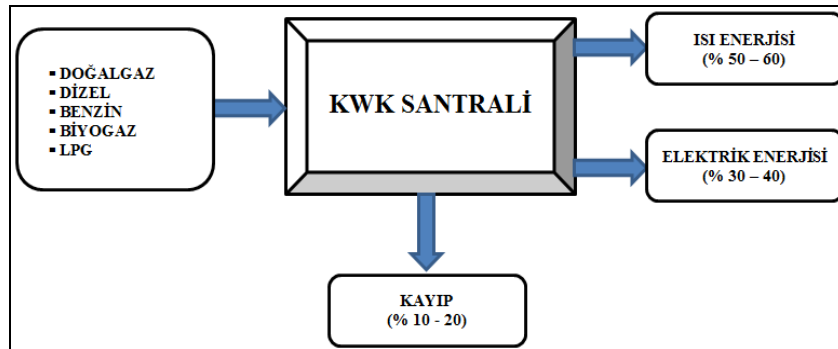
KWK (Güç-Isı Kuplajı) kavramı, elektrik ve ısı aynı anda üretilmesi anlamına gelmektedir. Duruma göre güç-ısı kuplajı tesislerinin elektrik veya ısı üretenleri arasında karar verilebilir. Yüksek etkililiği nedeniyle tesislerin ısı üretmesi tercih edilmelidir. Bu işlem için neredeyse daima bir jeneratöre bağlanmış olan kombine ısı ve güç santralleri kullanılır. Motorlar, doğrudan bağlanan jeneratörün şebeke frekansına uyumlu elektrik

enerjisi üretebilmesi için sabit devirle çalıştırılır. Jeneratörün tahriki veya elektrik üretimi için alternatif veya perspektifsel olarak alışıldık içten yanmalı motorlar ve içten yanmalı gaz motorları dışında mikrogaz türbinleri, stirling motorları veya yakıt hücreleri de kullanılabilir [160].



Şekil 3.16. Bir kojenerasyon santralinin yapısı ASUE (Tasarruflu ve Çevre Dostu Enerji Tüketimi için Çalışma Grubu Derneği) [160].

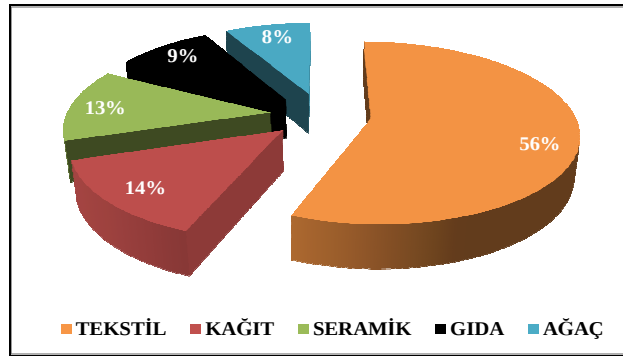
KWK sistemleri pek çok ülkede, anaerobik fermentasyondan elde edilen biyogazın enerjiye dönüşümünde kullanılmakta, fosil yakıtların kullanımında olduğu gibi biyogazdan da ısı ve/veya elektrik enerjisi üretilebilmektedir. KWK sistemleri, yakıtın enerji içeriğinin yaklaşık %30'unun elektrik ve %60'ının ısı enerjisi olmak üzere toplamda %90'lık kullanıma olanak sağlar [202,212]. Şekil 3.17'de bir KWK santralinde kullanılan yakıtlar, sistem kaybı, üretilen ısı ve elektrik enerjisi miktarları şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.17. Birleşik ısı ve güç santralinin şematik görünüşü [202,212].

Biyogaz uygulamalarında KWK 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 [41].

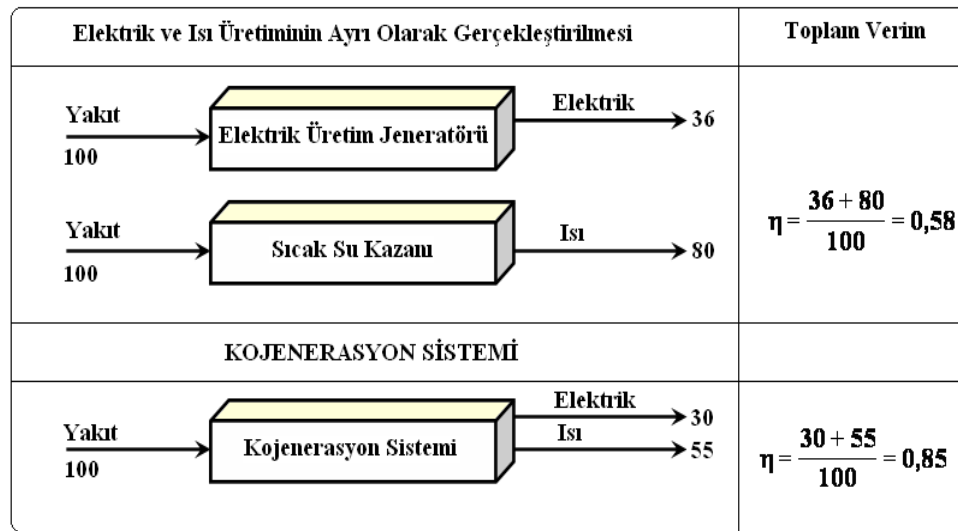
KWK sistemlerinin ekonomik ve çevresel faydalarının incelenmesi ile ilgili yapılan çalışmalarda, bölgesel olarak farklılıklar gözlenmiştir. Bazı örneklerde sistem, mevcut elektrik şebekesinden daha ucuz üretim sağlarken, bazı örneklerde şebekeden daha pahalı üretim gerçekleşmiştir [213]. Bu nedenle anaerobik fermentasyonda kullanılan KWK sistemlerinin değerlendirilmesinde bölgesel koşullar önemlidir. Ayrıca uzun mesafelerde elektriğin iletimi ısı enerjisinin iletimine göre daha ucuz ve efektifdir. Bu sebepten dolayı KWK 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. KWK sistemleri 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 [214]. Türkiye’de KWK sistemlerinin kullanıldığı alanlar Şekil 3.18’de özetlenmiştir.



Şekil 3.18. Türkiye’de birleşik ısı ve güç sistemlerinin kullanıldığı alanlar [214].

KWK 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 [213,215].

KWK 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 [216]. Şekil 3.19’da konvansiyonel elektrik ve ısı üretimi ile kojenerasyon ünitelerinin verimlerinin karşılaştırılması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.19. Konvansiyonel elektrik ve ısı üretimi ile kojenerasyon ünitelerinin verimlerinin karşılaştırılması

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. KWK sistemlerinin değerlendirilmesinde genel olarak, ısı ve elektriği ayrı ayrı üreten sistemlerle mukayese edilir ve verimleri karşılaştırılır [216].

3.10.1.1. İçten Yanmalı Motorlu Kombine Isı ve Güç Santralleri

BHKW (Kombine Isı ve Güç Santrali) modülü içten yanmalı bir motor ile buna uyarlanmış bir jeneratörün yanı sıra atık gazlardan, soğutma suyundan ve yağ çevriminden ısı enerjisi geri kazanmaya yarayan ısı aktarma sistemlerinden, ısı dağıtımı için hidrolik düzeneklerden, elektrik dağıtımı ve BHKW kumandası için elektrikli devre ve kumanda düzeneklerinden oluşmaktadır. Motor olarak gaz motorları veya çift yakıtlı motorlar kullanılır. Çift yakıtlı motorlar geçmişte çok sık kullanılırken, yeni tesislerde üçte iki oranında gaz motorları kullanılmaktadır. Bunlar Otto ilkesine göre ayrı bir ateşleme yakıtı olmadan çalışır, aradaki tek fark sadece kompresyondadır [160].

▪ Gaz Motorları

Gaz motorları, Otto ilkesine göre çalışan ve özel olarak gazla çalışmaları için tasarlanmış motorlardır. Motorlar, nitrik asit emisyonunu asgariye indirmek için yüksek miktarda hava ile çalıştırılan fakir karışımla çalışan motorlardır. Fakir karışım modunda motorda daha az yakıt yakılabilir, bu da motorların performanslarının düşmesine neden olur. Bu da motorların egzoz turbo yükleyici tarafından doldurulması suretiyle dengelenir. Gazlı benzinli motorlar biyogazda en az yaklaşık % 45 oranında bir metan payına ihtiyaç duyarlar. Daha düşük metan oranlarında çalışmazlar. Biyogazın mevcut olmadığı durumlarda gazlı motorlar örneğin doğalgaz gibi diğer gaz türleriyle de çalıştırılabilmektedir [217]. Motorların atık ısısı üzerinden gereken proses sıcaklığını sağlamak üzere biyogaz tesisinin çalıştırılmasında faydalı olabilir. Biyogaz için gaz kontrol hattının yanı sıra, yedek gaz için de ayrı bir hattın çekilmesi gerekmektedir [160]. Gazlı motorların biyogaz kullanımı bakımından önem taşıyan referans verileri Tablo 3.30'da gösterilmiştir.

Tablo 3.30. Gazlı benzinli motorların referans değerleri ve uygulama parametreleri [160].

Referans Değerler	• > 1 MW'ye kadar elektrik gücü, 100 kW altında nadiren rastlanır • Elektrik verimleri % 34-42 (elektrikli anma güçleri > 300 kW durumunda) • Ömrü: Yaklaşık olarak; 60.000 çalışma saati • Yaklaşık % 45 metan oranı üzerinde kullanılabilir
Uygunluk	• Temelde tüm biyogaz tesisleri, ekonomik kullanım için daha ziyade daha büyük tesislerde
Avantajları	- t Özel olarak gazın değerlendirilmesi için yapılmış - t Emisyon sınır değerlerine büyük ölçüde uyuluyor (ancak formaldehit değerlerinde sınır değerlerinin aşılması mümkün) - t Bakım için düşük iş yükü - t Toplam etki derecesi, çift yakıtlı motorlardan daha yüksek
Dezavantajlar	- Çift yakıtlı motorlar karşısında az miktarda artan yatırım maliyetleri - Düşük parça sayılarında imalat yüzünden daha yüksek değer - Alt güç bölgesinde çift yakıtlı motorlara göre daha düşük elektrik verimi
Özel Durumlar	• Düşük ısı ihtiyacında aşırı ısınmayı engellemek için bir acil durum radyatörü öngörülmelidir • Gaz kalitesine bağlı olarak güç ayarlaması mümkün ve önerilmektedir
Yapı Formları	• Tek başına ünite olarak bir binada veya kompakt yapı tipinde konteynerde

▪ Çift Yakıtlı Motorlar

Çift yakıtlı motorlar dizel prensibine göre çalışırlar. Bunlar özel olarak gaz yakılması için geliştirilmemiştir ve böylelikle modifikasyonlara tabi tutulmalıdır. Biyogaz bir gaz karıştırıcısı üzerinden yanma havasına karıştırılır ve bir enjeksiyon tertibatı üzerinden yanma odasına aktarılan tutuşturma yakıtı üzerinden tutuşturulur. Tutuşturma yakıtı oranı, eklenen esas yanıcı madde gücünün yaklaşık % 2-5'i oranında olacak şekilde ele alınmaktadır. Püskürtülen tutuşturma yakıtının nispeten düşük miktarı yüzünden, enjeksiyon memelerinin soğutmasının bulunmaması nedeniyle, bunların karbonlaşması ve böylece daha çabuk aşınması tehlikesi bulunmaktadır [217]. Çift yakıtlı motorlar da yüksek hava miktarıyla çalışırlar. Yük ayarlaması, aktarılan tutuşturma yakıtı miktarının veya gaz miktarının ayarlanması ile gerçekleştirilir. Biyogaz beslemesinin devre dışı kalması durumunda çift yakıtlı motorlar saf tutuşturma yakıtı veya dizel yakıtı ile çalıştırılabilir. Yedek yakıtlara geçiş problemsiz bir şekilde mümkündür ve biyogaz tesisinin ilk

çalıştırılması sırasında proses ısısı hazırlanması için gerekli olabilir. Tutuşturma yakıtı olarak sadece kolza metil esteri veya diğer kabul görmüş biyokütleler gibi rejeneratif tutuşturma yakıtları söz konusu olur. Ancak uygulama sırasında motor üreticilerinin kalite taleplerine uyulmalıdır [160]. Çift yakıtlı motorların referans değerleri ve uygulama parametreleri Tablo 3.31’de görülmektedir.

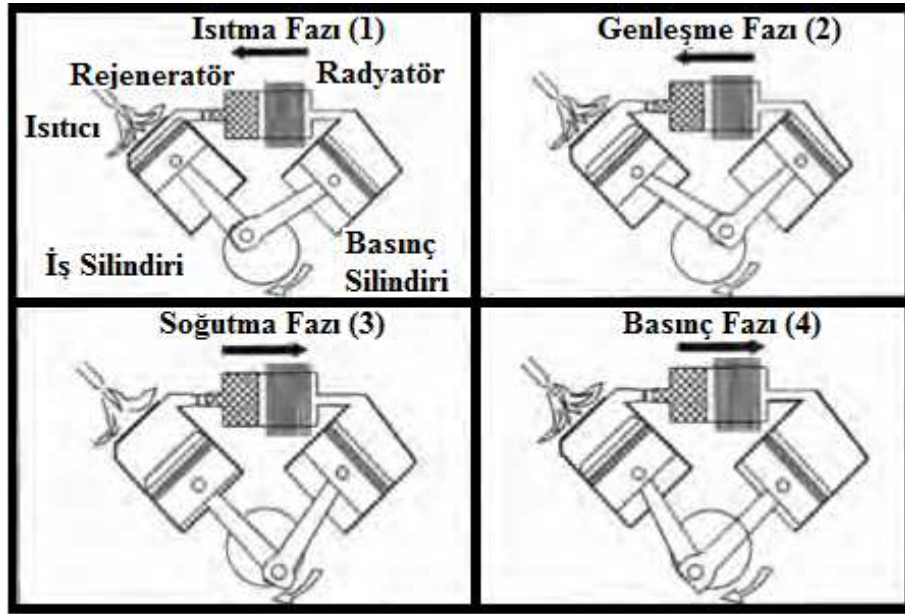
Tablo 3.31. Çift yakıtlı motorların referans değerleri ve uygulama parametreleri [160].

Referans Değerler	• Yanma için % 2–5 tutuşturma yakıtı oranı • Yaklaşık 340 kW’ye kadar elektrik gücü • Ömrü: Yaklaşık olarak; 35.000 çalışma saati • Elektrik verimleri % 30-44 (daha küçük tesislerde % 30)
Uygunluk	• Temelde tüm biyogaz tesisleri, ekonomik kullanım için daha ziyade daha küçük tesislerde
Avantajları	- t Standart motorların uygun maliyetli kullanımı - t Gazlı benzinli motorlara kıyasla alt güç bölgesinde yükselen elektrik verimi
Dezavantajlar	- Enjeksiyon memelerinin karbonlaşması atık gaz yüklerinin (NO_x) artmasına ve daha sık bakım çalışmalarına neden olur. - Motorların biyogaza özgü geliştirilmesi söz konusu değil - Komple verimleri gazlı benzinli motorlardan daha düşük - İlave bir yanıcı madde (tutuşturma yakıtı) kullanılmalıdır - Zararlı madde çıkışı sık sık TA (Teknik Talimat)- hava içinde verilen sınır değerlerini aşıyor - Kısa ömürler
Özel Durumlar	• Düşük ısı ihtiyacında aşırı ısınmayı engellemek için bir acil durum radyatörü öngörülmelidir • Gaz kalitesine bağlı olarak güç ayarlaması mümkün ve önerilmektedir
Yapı Formları	• Tek başına ünite olarak bir binada veya kompakt yapı tipinde konteynerde

3.10.2. Stirling Motorları

Stirling motoru bir sıcak gaz veya genleşme motorudur. Burada pistonlar yanmalı motorlarda olduğu gibi yanıcı gazların içten yanma sonucu genleşmeleriyle değil, harici bir enerji kaynağından gelen enerji veya ısı aktarımıyla genleşen bir gazın sağladığı güçle hareket eder. Enerji veya ısı kaynağının stirling motorundaki asıl güç üretimiyle olan bağlantısının kesilmesinin ardından, ihtiyaç duyulan ısı, örneğin biyogazla çalışan bir brülör gibi farklı enerji kaynaklarından sağlanabilir. Stirling motorunun temel prensibi, bir

gazın bir ısı değışikliğı esnasında belli bir hacim değıştirme işi yapması esasına dayanır. Bu çalışma gazı sabit yüksek sıcaklıkta bir bölme ile sabit düşük sıcaklıkta bir bölme arasında gidip geldiğı takdirde, motorun sürekli işletimi mümkün olur. Bu şekilde çalışma gazı bir çevrim içine girer [160]. Motorun çalışma prensibi şekil 6.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Bir stirling motorunun çalışma tarzı [218].

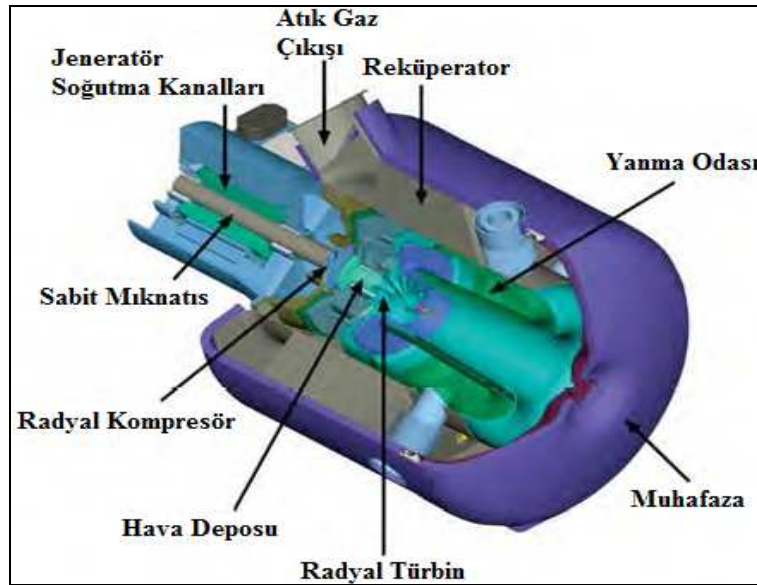
Sürekli yanma nedeniyle stirling motorları düşük zararlı madde ve gürültü emisyonuna sahip oldukları gibi, bakım ihtiyaçları da düşüktür. Yapı parçalarına az yük binmesi ve kapalı gaz çevrimi nedeniyle, bakım giderleri de düşüktür. Elektriksel verimi geleneksel gaz motorlarına kıyasla düşüktür ve % 24 ila 28 arasında bulunmaktadır. Stirling motorlarının gücü öncelikli olarak 100 kW_{el} ‘den daha azdır. [219]. Dış yanma nedeniyle biyogaz kalitesi beklentisi düşüktür, bu yüzden de düşük metan oranlarına sahip gazlar da kullanılabilir [220]. Biyogazın önceden saflaştırılmasına gerek duymaması, stirling motorunun geleneksel biyogaz yanmalı motorlara kıyasla en büyük avantajı olabilir. Dezavantaj olarak yük değışimi esnasındaki yavaşlıktan söz edilebilir, ancak kombine ısı ve güç santralleri gibi sabit tesislerde bu durum örneğın taşıtlara kıyasla çok daha önemsiz bir rol oynamaktadır [160].

Doğalgazla çalışan stirling motorları, çok küçük güç sınıflarıyla piyasada satılmaktadır. Ancak stirling motorlarının biyogaz teknolojisinde rekabet edebilir hale

gelebilmesi için, daha çok çeşitli teknik gelişmelerin gerçekleşmesi gerekmektedir. Stirling motoru tıpkı çift yakıtlı motor ya da gazlı motor sistemleri gibi BHKW (Kombine Isı ve Güç Santrali)’de kullanılabilir [160].

3.10.3. Mikrogaz Türbinleri

Mikrogaz türbinleri ya da mikro türbinler, 200 kW_{el} olmak üzere alt elektriksel güç alanında, düşük yanma odası sıcaklığına sahip küçük, hızlı çalışan gaz türbinlerini tanımlamaktadır. Halen ABD ve Avrupa’da çeşitli mikrogaz türbini üreticileri bulunmaktadır. Mikrogaz türbinleri etki derecesini iyileştirmek için “normal” gaz türbinlerinin aksine, yanma havasının ön ısıtmaya tabi tutulduğu bir reküperatör bulunmaktadır [160]. Bir mikrogaz türbininin yapısı şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Bir mikrogaz türbininin yapısı [160].

Gaz türbinlerinde hava çevreden emilir ve bir kompresörde sıkıştırılır. Hava bir yanma odasına girer ve burada biyogaz eklenmek suretiyle yanar. Bu arada gerçekleşen ısı yükselmesi, hacim genişlemesine neden olur. Sıcak gazlar, gerilimlerinin düşürüldüğü bir türbine girerler. Bu arada kompresörün çalıştırılması için gerekenden çok daha fazla güç açığa çıkar. Kompresörün tahriki için gerek duyulmayan enerji ile elektrik üretmek amacıyla bir jeneratör çalıştırılır [160].

Yaklaşık 96.000 d/dak'lık bir devirle yüksek frekanslı alternatif elektrik enerjisi üretilir, bu elektrik enerjisi de bir güç elektroniği üzerinden elektrik şebekesine verilebilecek şekilde hazırlanır. Mikrogaz türbinleri biyogaz için kullanılacaksa, doğalgaz işletimine göre yanma odalarında veya yakıt memelerinde değişikliklerin yapılması gerekir. [221]. Mikrogaz türbinlerinin ses emisyonları yüksek bir frekans alanında bulunurlar ve iyi bir şekilde yalıtılabilirler [160].

Biyogaz, mikro türbinin birkaç barlık yüksek basıncın bulunduğu yanma odasına girmek zorunda olduğu için, gaz basıncının artırılması gereklidir. Yanma odası basıncının yanı sıra akış ve kütle debisine bağlı gaz hattı, valf ve brülör üzerinden basınç kayıpları dikkate alınmalı, basınç 6 bar seviyesine çıkartılmalıdır. Bunun için mikrogaz türbininin yakıt tarafında bir kompresör çalıştırılır [160].

Biyogaz içinde bulunan istenmeyen yan maddeler (özellikle de su ve siloksan) mikrogaz türbinine zarar verebilirler, bu yüzden gazın kurutulması veya filtreden geçirilmesi ($10 \text{ mg/m}^3 \text{ CH}_4$ üzerindeki siloksan miktarlarında) gerekmektedir. Buna karşın mikrogaz türbini kükürte karşı gaz motorlarından daha büyük bir toleransa sahiptir. Mikrogaz türbinleri % 35 ila 100 metan oranına sahip biyogazı kullanabilirler [221,222].

Hava beslemesiyle kesintisiz yanma ve düşük yanma odası basıncı, mikrogaz türbinlerinin motorlara göre çok daha düşük atık gaz emisyonuna sahip olmasına neden olur. Bu da atık gaz kullanımında örneğin yem maddelerinin doğrudan kurutulması ya da seralarda bitkilerin CO_2 ile gübrelenmesi alanlarında yeni yöntemlerin kullanılmasını mümkün kılar. Atık ısı görece yüksek bir sıcaklık seviyesinde bulunmaktadır ve sadece atık gazlar üzerinden taşınabilir. Bundan ötürü ortaya çıkan ısı, yanmalı motorlara kıyasla daha düşük maliyetli ve teknik bakımdan kullanımı daha basittir. [195,221,223].

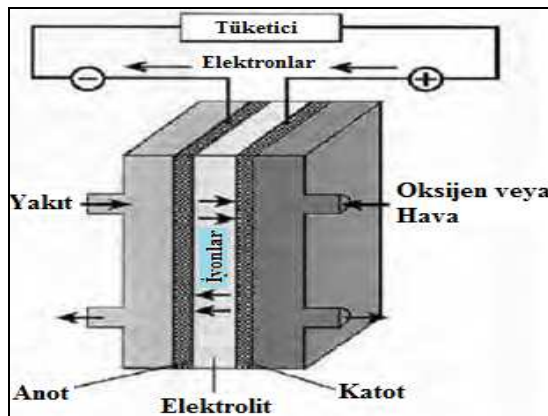
Bakım aralıkları en azından doğalgazla çalıştırılan mikrogaz türbinlerinde, motorlara kıyasla çok daha uzundur. Bakım aralığı olarak üreticiler yaklaşık toplam 80.000 saatlik bir ömürde 8.000 saatte bir bakım önermektedirler. Yaklaşık 40.000 saatlik bir çalışmadan sonra genel bir rektifiye ve sıcak gazla temas eden parçaların değiştirilmesi gereklidir [160].

Mikrogaz türbinlerinin bir dezavantajı, yaklaşık % 30 düşük elektriksel verimleridir. Geleneksel biyogaz motorlarına göre bu oldukça düşük bu değer yine de iyi bir kısmi yük etkisiyle (% 50-100) ve bakımlar arasındaki sabit verim değeriyle telafi edilmektedir. Eşdeğer performansa sahip diğer motorlara kıyasla yatırım giderleri % 15-20 daha yüksektir [223]. Ancak mikrogaz türbinlerinin piyasada daha çok kullanımlarıyla birlikte, fiyatların da düşeceği tahmin edilmektedir [160].

3.10.4. Yakıt Hücreleri

Yakıt hücrelerinin etki tarzı, biyogazdan enerji kazanımının geleneksel yöntemlerinden asli olarak ayrılmaktadır. Kimyasal enerjinin elektriğe dönüşmesi burada doğrudan gerçekleşir. Yakıt hücreleri neredeyse emisyonuz bir işletme tarzında % 50'ye kadar varan yüksek elektriksel verimi garanti eder. Kısmı yük uygulamasında da yüksek verimlere ulaşılabilir [160].

Yakıt hücrelerinin fonksiyon prensibi, suyun elektrolizinin aksi yönüne benzerlik gösterir. Elektroliz su molekülleri esnasında elektrik enerjisi yardımıyla hidrojen (H_2) ve oksijene (O_2) ayrılırlar. Buna karşın bir yakıt hücresinde H_2 ve O_2 elektrik enerjisi verilmek suretiyle ısıya ve suya (H_2O) dönüştürülür. Böylece yakıt hücresi elektrokimyasal reaksiyon için hidrojen ve oksijene “yakıt” olarak ihtiyaç duyar [224]. Yakıt hücrelerinin yapısı prensip olarak daima aynıdır. Asıl hücre, bir elektrolit tarafından ayrılan ve gaz taşıyan iki levhadan (anot ve katot) oluşur. Elektrolit olarak farklı yakıt hücresi tiplerinde farklı maddeler kullanılır [160]. Şekil 3.22’de yakıt hücresinin çalışması görülmektedir.



Şekil 3.22. Bir yakıt hücresi çalışma prensibi [160].

Yakıt hücreleri kullandıkları elektrolitlerin tipine göre isimlendirilir ve düşük (AFC, PEMFC, PAFC, DMFC) ve yüksek ısı yakıt hücreleri (MCFC, SOFC) olarak alt gruplara ayrılırlar. Hangi hücrenin kullanım için en uygun olduğu ısı değerlendirmesinin ve kullanılabilir güç sınıflarının türüne bağlıdır [160].

PEM (Polimer Elektrolit Membran) yakıt hücreleri, küçük biyogaz tesislerindeki kullanım için başarı vaat eden bir olasılık teşkil etmektedirler. İşletim sıcaklıkları (80 °C) sayesinde ısı doğrudan mevcut bir sıcak su şebekesine aktarılır. Kullanılan elektrolitin türüne göre PEM'in yüksek kullanım ömrü olabilir, ancak yine de yakılan gazın içindeki kirlenmelere karşı çok hassastır. Her şeyden önce reformasyon esnasında oluşan karbonmonoksit hâlen eleştirel gözle bakılmaktadır [160].

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) yakıt hücrelerinin en gelişmiş olanıdır. Bu yakıt hücresi doğalgaz kullanımı için dünyada en sık tercih edilendir ve halen uygulama testinde 80.000 işletme saatini geçebilen yegane ticari yakıt hücresidir [225]. Halen biyogazın yakıt olarak kullanımı için 100-200 kW_{el} güçlerde PAFC hücreleri temin edilebilmektedir. % 40'lara kadar elektriksel verim mümkündür. PAFC karbondioksit ve karbonmonoksit karşı daha az duyarlıdır [160].

MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) elektrolit olarak bir karbonat eriyiği ile çalıştırılır. Karbonmonoksit karşı duyarlı değildir ve % 40 hacimsel oranına kadar karbondioksiti tolere eder. Çalışma sıcaklığı nedeniyle (600–700 °C) reformasyon hücrenin içinde de gerçekleşebilir. Hücrenin atık ısısı örneğin ardıl devrelenmiş türbinlerde kullanılmaya devam edilebilir. MCFC sistemlerinde 40-300 kW_{el} büyüklüğündeki güçler için elektriksel verimi % 50'ye kadar yükselebilir ve şu anda piyasaya girme aşamasında bulunmaktadır [225].

Bir diğer yüksek ısı yakıt hücresi de SOFC'dir (Solid Oxide Fuel Cell). Bu yakıt hücresi 600 ila 1.000 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışır. Yüksek bir elektriksel verime sahiptir (% 50'ye kadar) ve burada da metanın hidrojene reformasyonu hücre içinde gerçekleşebilir. SOFC kükürte karşı düşük bir duyarlılık geliştirmiştir, bu da biyogazın değerlendirilmesinde bir avantaj sağlamaktadır. Ancak biyogaz için uygulaması halen araştırma ve pilot proje aşamasında bulunmaktadır. Mikrobiyogaz şebekelerinin en küçük

alanları için kullanımı öngörülebilir. Üreticiler tarafından halen PEMFC tercih edilmektedir, ancak bu da daha küçük güç alanlarında SOFC ile rekabet etmektedir. SOFC'nin etki derecesi yüksektir, ancak maliyeti de aynı şekilde daha fazladır [225].

3.10.5. Elektrikle Çalışan Güç-Isı Kuplajında Atık Isı Kullanımı

Doğalgaz/biyometan alanında BHKW'lerin kontrolü için ağırlıklı nokta ısı ihtiyacıdır. Bu, BHKW ısı ihtiyacına göre işletilmesi esnasında elektriğin herhangi bir kısıtlamaya tabi olmaksızın verilebileceği anlamına gelmektedir. Bundan ötürü ısı üretimi amacıyla da çalışan BHKW'ler genelde bir ısı tüketim noktasının ısı ihtiyacının ana yükünü karşılamalıdır (yıllık ihtiyacın % 70-80'ini), bu arada uç tüketim ihtiyacı için ek kazanlarda hazır bulundurulmalıdır. Elektrikle üretimi ağırlıklı çalışan güç-ısı kuplajlarından ise BHKW'nin yük eğrilerinden elektrik ihtiyacı tanımlandığı zaman söz edilebilir. Bu da ancak bir elektrik beslemesi olmadığı ya da görece sabit bir elektrik ihtiyacı söz konusu olduğunda gerçekleşebilir. Yeterli sayıda ısı köprüsü bulunan büyük tesisler veya sanayi kuruluşları buna uygundur. Yüksek çalışma saatlerine ulaşabilmek için ısı depolama imkânlarının mevcut olması ve ek olarak ana yükü karşılaması gerekir. Bu tesisler sıklıkla bir yük yönetimine sahiptirler. Bu, BHKW'nin ihtiyaç anında faydalanım opsiyonlarını değiştirebileceği anlamına gelmektedir ki, bu da örneğin konutlarda veya hastanelerde avantajlı olabilmektedir [160].

Pratik olarak desentral elektrik kazanımlı biyogaz tesislerinin büyük kısmının, aslında üretilen elektrik miktarının azami ikmal edilebilen elektrik miktarına göre düzenlenebildiği bir elektrikli güç-ısı kuplajı olduğu anlamına gelmektedir. Bu sadece kullanıma hazır gaz miktarı ya da BHKW'nin büyüklüğü sınırlandırmaktadır [160].

3.10.5.1. Isı hazırlanması/Isı dağılımı (Yakın Isı Şebekeleri)

Yerinde elektrik üreten bir biyogaz tesisinin ekonomik olarak işletilmesi için belirleyici faktörlerden birisi, elektrik kazanımı esnasında ortaya çıkan ısının satılmasıdır. Özellikle kırsal bölgelerde bu ısı civar sakinlerine satılabilir. Genel bir satış için yakın ısı şebekelerinin kurulumu söz konusu olabilir. Bu şebeke, suyu 90 °C (gidiş) ve 70 °C (geliş) sıcaklığı ile nakleden çift sarmal yalıtımlı çelik veya plastik borulardan oluşmaktadır [160].

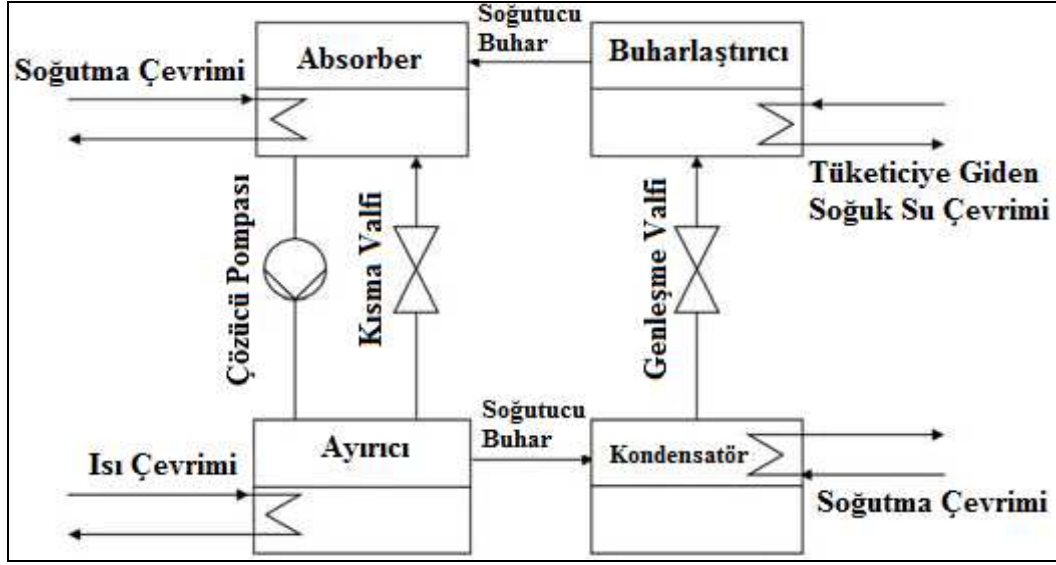
Biyogaz tesisinin ısısının şebekeye verilmesi ısı aktarıcılar ile gerçekleşir, binalar ve aktarım istasyonları ısı sayaçlarıyla donatılır. Yakın ısı boruları bir sızıntı tanıma sistemine sahip olmalı ve trafik yüklerine ve düşük ısılara dayanabilmeleri için yeterli derinliğe (1 m) döşenmeleri gerekmektedir. Bunun dışında aşağıdaki noktalara da dikkat edilmelidir;

- Zamanında ön planlama ve konsept oluşturulması,
- Yüksek bir asgari ısı satımı seviyesi,
- Yeterli sayıda şebekeye bağlı konut ünitesi (asgari 40),
- Şebekeye bağlı konut ünitelerinin birbirlerine mümkün olduğunca yakın bulunmaları [160].

Şebekeye bağlı ısı alıcıları için büyük enerji piyasalarına karşı bağımsızlık, buna bağlı yüksek tedarik güvencesi ve nihai olarak enerji maliyetlerinde düşüş bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Isı pazarlamasının bu formu bu güne dek çok sayıda biyoenerji köyünde (örneğin Jühnde, Freiamt veya Wolpertsthausen) gerçekleştirilmiştir. Hat uzunlukları 4 ila 8 km arasında değişmektedir [160].

3.10.5.2. Soğuk Üretimi

Yanma prosesinden kaynaklanan ısıdan bir başka istifade yöntemi ise bu ısıyı soğuğa dönüştürmektir. Bu, adsorbsiyon ve absorbsiyon olmak üzere ikiye ayrılan sorbsiyon yöntemleri tarafından gerçekleştirilir [160]. Şekil 3.23'te absorbsiyon soğutma makinesinin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.23. Bir absorpsiyon soğutma makinesinin çalışma şeması [160].

Soğuk üretmek için soğutucu ve çözücülerden oluşan bir çalışma maddesi çifti kullanılır. Çözücü bir soğutucu maddeyi absorbe eder, sonra ondan yine ayrılır. Çalışma maddesi çifti olarak 6/12 °C sıcaklık alanı için su (soğutucu) ve lityumbromid (çözücü), 60 °C'ye kadar olan sıcaklık alanı için amonyak (soğutucu) ve su (çözücü) olarak kullanılabilir [160].

Çözücü ve soğutucu, ekstaktörde birbirinden ayrılacaktır. Bunun için çözeltinin ısıtılması gerekir, bu amaçla da BHKW tarafından kullanıma sunulan ısı değerlendirilir. Soğutucu düşük kaynama noktası nedeniyle ilk olarak buharlaşır ve kondensatöre ulaşır. Artık içinde soğutucu bulunmayan çözücü ise absorbere ulaşır. Soğutucu, kondensatörde soğutulur ve bu şekilde sıvılaştırılır. Bunun ardından bir genleşme valfinde istenilen sıcaklığa karşılık gelen buharlaştırma basıncına tabi tutulur. Soğutucu buharlaştırıcıda ısı almak yoluyla buharlaşır. Tüketicilerin bağlı bulunduğu soğuk döngüsünün asıl soğutması esas olarak burada gerçekleşir. Bu esnada oluşan soğutucu buharı absorbere akar. Soğutucu absorberde çözücü tarafından alınır (emilir), böylece döngü tamamlanmış olur [182,226].

Burada tek hareketli yapı parçası çözücü pompasıdır, bundan ötürü bu tesislerin aşınma ve dolayısıyla bakım giderleri çok düşüktür. Absorpsiyon soğutma sistemlerinin bir başka avantajı kompresyon soğutma sistemlerine göre daha düşük enerji tüketmeleridir,

ancak diğeri kadar düşük sıcaklıklar üretmezler. Bu yöntem günümüzde sütleri soğutma veya ahır iklimlendirmesi gibi çeşitli tarımsal alanlarda kullanılmaktadır [160].

3.10.5.3. Ardıl Elektrik Kazanımı Konseptleri

ORC tekniği (Organic Rankine Cycle) ile BHKW'nin çok yüksek olmasa bile fazla atık ısısının, hangi kısımlarının tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini saptamaya yarayan bir teknolojidir. Bu teknolojinin prensibi buhar gücü prosesine dayanmaktadır ancak burada akışkan olarak su değil, düşük kaynama ve yoğunlaşma noktalarına sahip başka maddeler uygulama alanı bulmaktadır. Bu proses ilk kullanım yeri olan jeotermik elektrik üretiminden kaynaklanmaktadır ve bu alanda yıllardan beri başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Akışkan olarak hâlihazırda çevre dostu maddeler (silikon yağı) denenmekte olup, bu sayede bu güne dek kullanılan kolay tutuşabilir (tuluol, pentan, propan) veya çevreye zarar veren (FCKW) maddeleri piyasadan giderek çekilmektedir. ORC prosesi her ne kadar bu güne dek ahşabın yakıt olarak kullanıldığı ısı santrallerinde gerçekleştirildiyse de, bu teknolojinin motorlarda biyogaz yakımıyla kombinasyonu henüz geliştirme aşamasındadır [220]. Tahminen 1 MW_{el.} gücündeki bir BHKW'nin ürettiği güce ek olarak ORC prosesi tarafından da 70-100 kW_{el.}'lik (% 7-10) bir güç üretilebilir [227]. Yaklaşık olarak 100 kW_{el.} gücünde bir OCR prototipi geliştirilmiştir. Halen ardıl ORC teknolojisini kullanarak işletmeye geçmiş olan az sayıda biyogaz tesisi vardır [228].

ORC teknolojisine alternatif olarak, ilave bir jeneratörü doğrudan atık gaz türbinine bağlamak ve bu sayede ek bir elektrik gücü oluşturarak motor verimini yükseltmek gibi yeni gelişmeler de bulunmaktadır [160].

3.10.6. Doğalgaz Şebekesine Biyogaz Beslemesi

Hazırlanan biyogazın şebekeye verilmesi farklı şebeke tiplerinde farklı basınç basamaklarında gerçekleşebilir. Örneğin düşük (100 mbar'a kadar), orta (100 mbar ila 1 bar) ve yüksek basınç şebekeleri (1 ila 120 bar) bulunmaktadır. Sıklıkla uluslararası uzak iletim şebekesi, bölgelerarası iletim şebekesi, bölgesel iletim şebekesi ve bölgesel dağıtım şebekesi arasında fark gözetilmektedir [178]. Arz giderlerinin optimizasyonu için hazırlama işleminin çıkış basıncı, sonradan oluşabilecek sıkıştırma giderlerini asgariye

indirebilmek için mevcut şebeke basıncına uyumlaştırılmalıdır. Hazırlanan biyogazın aktarılması için iletim hattında bulunan besleme noktasındaki basınç üzerinde bir basınç gerekmektedir. Her besleme noktası, basınç seviyesinin gözetimi için kendi basınç düzenleme ölçüm istasyonuna sahip olmalıdır [160].

Biyogazın şebekeye verilmesi amacı söz konusu olduğunda, BHKW'nin artık yer almayacak olması dışında biyogaz tesisinin konfigürasyonunda asli bir değişiklik olmayacaktır. BHKW'nin olmaması nedeniyle proses için gerekli elektrik enerjisi ve ısısının hazırlanmasında alternatif yöntemler düşünülmelidir. Elektrik enerjisi şebekeden alınabilir, fermentörün ısıtılması ve gerektiği takdirde hazırlama teknolojilerinin zorunlu proses ısısı (örneğin amin yıkama) örneğin ısı kazanlarından temin edilebilir. Bir başka imkan da, ihtiyaç duyulan proses enerjisini temin edebilecek şekilde işletilen bir BHKW'nin paralel olarak çalıştırılmasıdır. Geri kalan biyogaz şebekeye verilmek üzere kullanılabilir [160].

3.10.7. Biyogazın Termik Kullanımı

Hazırlanan biyogazın ısı sağlanması için yakılması sorunsuz olarak mümkündür. Bunun için kullanılan brülörler, genellikle çeşitli yakıtlar için ayarlanabilen türdendir. Doğalgaz kalitesinde hazırlanmamış biyogaz için cihazların biyogaz işletimine göre ayarlanması gerekir. Demir harici metallerden ve düşük kaliteli çelik alaşımlarından parçalar içeren cihazlarda, biyogazın içerdiği hidrojen sülfür nedeniyle korozyon tehlikesi mevcuttur, bundan ötürü bu metallerin değiştirilmesi ya da biyogazın saflaştırılması gerekmektedir [160].

Atmosferik ve fanlı brülörler mevcuttur. Atmosferik cihazlar yanma için gereken havayı çevrelerinden kendileri emerler. Gereken gaz ön basıncı yaklaşık 8 mbar dolayındadır ve genellikle biyogaz tesisi tarafından temin edilebilir. Fanlı brülörlerde yanma için gereken hava bir fan tarafından temin edilir. Burada brülörde ihtiyaç duyulan ön basınç asgari 15 mbar dolayındadır. Gaz ön basıncının sağlanması için, gaz kompresörlerinin kullanımına da gerek vardır [182].

3.10.8. Taşıtlar İçin Yakıt

İsveç'te ve İsviçre'de biyogaz uzun yıllardan bu yana otobüslerde, kamyonlarda ve özel alanlarda da yakıt olarak kullanılmaktadır. Almanya'da da geniş uygulama imkânı bulamayan pek çok proje üretilmiştir. Jameln'de saf biyometan satan bir biyometan yakıt istasyonunun yanı sıra, 2009'dan bu yana 70'ten fazla yakıt istasyonunda doğalgaza biyogaz karıştırılmaktadır [229].

İçten yanmalı motorların gaz yakıtla çalıştırılması yeni değildir. Gaz yakıt metan, ilk defa II. Dünya savaşı esnasında kullanılmış olup, günümüze kadar çeşitli gaz yakıtlarla bu tip teşebbüsler olmuştur. Bununla birlikte gaz yakıtın motorlarda kullanılması bazı problemler meydana getirmiştir. Bunlar, düşük kalorifik ısı ve yüksek sıvılaşma basıncı ile depolamada meydana gelen bazı problemlerdir. Literatürde bu problemlerin giderilmesi için çeşitli yollar denenmiştir [230,231].

Biyogaz taşıtlar için kullanılacak ise, şu anda kullanılmakta olan motorlu taşıtlar tarafından kabul edilebilecek bir kalitede hazırlanması gerekir. Motorlar için korozif etkisi olan örneğin hidrojen sülfür gibi maddelerin yanı sıra karbondioksit (CO₂) ve su buharı da biyogazdan ayrıştırılmalıdır. İlgili taşıtlar genellikle doğalgazla çalıştıkları için, biyogazın doğalgaz kalitesinde hazırlanması tavsiye edilir [160].

Gazla çalışan taşıtlar dünya pazarlarında satışa sunulmaktadır ve bütün isim yapmış motorlu taşıt üreticileri tarafından üretilmektedir, ancak bu alanda monovalan veya bivalan motorlu çeşitli modeller bulunmaktadır. Monovalan taşıtlar sadece gazla çalışır, ancak acil durumlar için küçük bir benzin depoları vardır. Bivalan işletimde ise motor gazla veya istenildiği takdirde benzinle de çalışır. Sıkıştırılmamış biyogaz ile hatırı sayılır yakıt deposu hacmi ihtiyacı nedeniyle kayda değer bir mesafe kat edilemez. Bundan ötürü biyogaz taşıtın bagajında veya altında bulunan basınçlı tanklarda yaklaşık 200 bar basınçla depolanır [160].

Petrol ürünleriyle çalışan tüm içten yanmalı motorlarda biyogaz kullanılabilir. Dizel motorlarda, karbüratörde % 10-30 motorin ve biyogaz karışımının sağlanması gerekmektedir [75]. Dizel motoru, termik veriminin yüksek oluşu ve ekonomik olması

sebebiyle, diğer içten yanmalı motorlardan daha çok kullanım alanı bulmuştur. Bu yüzden dizel motoru, biyogazın kullanılması için ilk düşünülen motor olmaktadır. Bu motorların dizelden biyogaz kullanımına dönüştürülmesi iki şekilde yapılır [232].

Dizel motoru otto çevriminde olduğu gibi bir ateşleme sistemi eklenerek, tamamen biyogazla çalışabilir bir duruma getirilebilir. Dizel motorlarında böyle ateşleme sistemi yerleştirecek bir yer olmadığından, bunu yapmak zordur. Yeterli biyogaz kaynağı bulunan yerlerde ve çok silindirli yüksek dolgulu motorlarda bu metodun kullanılması verimli olur. Böyle bir değişiklik, benzin ve gaz motorlarındaki gibi düşük sıkıştırma oranı gerektirmez. Bu da motorun orijinal gücünü ve bütün ana parçalarını muhafaza eder. Fakat böyle bir motorda ilk hareket güçlükleri meydana gelir [232].

İçten yanmalı motorlarda, düzensiz yanma ve basınç artışlarına vuruntulu yanma adı verilmektedir. Benzin ve dizel gibi sıvı yakıtları kalitelerine göre sınıflandırabilmek ve vuruntu eğilimini belirlemek için başvuru oktan ve setan sayıları yanında, gaz yakıtlarda da metan sayısı kullanılmaktadır [233]. Metan ve biyogaz vuruntuya karşı dirençlidir. Metanın oktan sayısı 120'dir. İçerdiği CO₂ nedeniyle biyogazın ise 100'ün biraz üzerindedir ve yüksek sıkıştırma oranlarında çalışabilir. Benzinde bu oran 89-98 arasında değişmektedir [234]. Bütanın metan sayısı 10 iken metanın 100, % 70 metana sahip biyogazın 130 olmaktadır. Tam yanma için gerekli hava miktarı 1 kg CH₄ için 14,5 kg havadır [174]. Biyogaz kullanımı benzinli motorda yaklaşık olarak % 15–20 güç düşümüne sebep olur. Doğal gaz ve arıtılmış biyogaz için bu güç düşümü % 10, LPG için % 5 civarındadır [174,234].

Dizel motorunun çift yakıtlı motora çevrilmesinde, bir gaz karbüratörü, hava filtresi ile emme manifoldu arasına bağlanır. Bu karbüratör, dizel motorunun kompresyon oranına göre, yakıtın ateşleme özelliği dikkate alınarak, yani gerekli biyogaz ihtiyacı hesaplanarak yapılır. Eğer biyogaz çok fazla, hava-biyogaz karışımının ateşleme sıcaklığı, sıkıştırma sonu sıcaklığından çok düşük ise erken ateşleme meydana gelir. Erken ateşleme vuruntuya sebep olur [232].

Çift yakıtlı motora çevrilen dizel motorlarında, biyogaz hava karışımı, silindir içerisine alındıktan sonra dizel kompresyon oranına kadar sıkıştırılır. Sıkıştırma zamanının

sonunda, dizel yakıtı enjekte edilerek yüksek sıcaklıktaki karışım ateşlenir. Çift yakıtlı bu motor, çeşitli oranlarda biyogaz ve dizel yakıtı ile çalışabilir. Dizel yakıtının minimum oranda (pilot yakıt olarak) kullanılması ekonomik olduğundan tercih edilir. Bu tip bir motorda ateşleme sıcaklığı, biyogazın içindeki metan bileşimine ve hava ile karışma oranına bağlıdır. Çok zayıf hava-biyogaz karışımı (biyogazın az olması) ateşleme sıcaklığını yükseltir. Sıkıştırma oranının yüksek olması, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığını yükseltir. Güç zamanının başlangıcında, yanma daha büyük bir basınç meydana getirir. Bu basıncın piston üzerine etkisi motor gücünü artırır. Genişleme strokunun daha büyük olması, yanmış gazların daha fazla genişletilmesine ve daha fazla iç enerjisinden yararlanılmasına sebep olur [232].

Tutuşma ve yanma, öncelikle karışım oranına, hava biyogaz karışımının sıcaklığına ve kompresyon oranına bağlıdır. Karışım oranı biyogaz içindeki metan yüzdesi ve bunun havayla karışmasıyla değişir. Hava içinde hacimsel olarak % 5-15 metan bulunan hava metan karışımı, 814°C de tutuşmaktadır. Metanın tutuşma sıcaklığı ise 700 ° C dir. Dizel motorunda sıkıştırma sonu sıcaklığı 700° C geçmemektedir. Bu sıcaklık biyogaz karışımının kendi kendini ateşleme sıcaklığından çok düşüktür. Bu da dizel motorlarında biyogazın kullanılması halinde erken ateşleme ihtimalini ortadan kaldırır. Bununla birlikte karışımın uygun zamanda, yani uygun ateşleme avans derecesinde tutuşmasını sağlamak için, pilot yakıt veya buji kıvılcımı gerekmektedir [232].

Pilot yakıt ile ateşleme, dizel motorunda kullanılan bir enjektörle, motorun dizel yakıtı ile çalışması esnasında harcanan toplam yakıt enerjisinin % 5-15 ine denk bir dizel yakıtının karışım içerisine püskürtülmesi ile sağlanır. Yanma odasına doğru uygun yönlendirilecek yakıt jetleri, birçok noktada birer yanma temin edecek ve bu noktalardan çeperlere olan uzaklıklar azaldığı için de, büyük yanma hızlarına ihtiyaç olmayacaktır. Pilot dizel yakıt ateşlemeli motorda; silindir içerisine her çevrimde, teorik olarak dolan hava miktarı sabittir. Bu durumda, biyogaz kontrolü ile hava-biyogaz karışımı istenilen oranlarda ayarlanabilir. Bu karışım için yine bir karbüratöre ihtiyaç vardır. Silindirdeki karışımın ateşlenmesi için, pompa kramiyer mili bir sınırlayıcı ile sınırlanarak, silindir içerisine sürekli olarak her çevrimde aynı miktarda dizel yakıtının püskürmesi sağlanır. Böylece biyogaz hava karışımının geniş bir alanı içinde, pilot yakıt ile motorun çalışması

sağlanır. Aynı zamanda istenildiğinde pompa pilot yakıt sınırlayıcısı serbest duruma getirilerek, biyogaz vanası kapatılıp, sadece dizel yakıtı ile çalışma sağlanır [232].

Kıvılcım ile ateşlemede belli konsantrasyon limitlerindeki karışım, yüksek kompresyonda sıkıştırılmıştır. Bu durumda, kıvılcımı bir uçtan diğerine atlatabilmek için, daha yüksek voltaja ihtiyaç vardır, fakat kıvılcım çok kuvvetli duruma da gelse, zayıf karışım pilot yakıt püskürtülmesindeki yanma gibi ateşleme yapamaz. Kıvılcım ısı enerjisini sınırlı bir miktarda ve yalnız bir noktada meydana getirir. Bu bir noktadan çeperlere olan uzaklıklar sebebiyle, yanma hızı yüksek tutulmalıdır. Yani karışım konsantrasyonu veya türbülansının artırılması gerekir. Her iki durumda da, yanma bir kere başladıktan sonra, lüzumlu zamanlar içinde tamamlanması gerekir. Bazen karışım tutuşunca, kalan kısmı sıkıştırarak ısıtır ve o bölgede zamanından önce tutuşma sınırına erişilerek yanma başlar. Bu ise vurutuya sebep olur. Bunu önlemek için, ortalama bir yanma oranı temin etmek gerekir [232].

Yanma için uygun biyogaz, hava veya biyogazın miktarının değiştirilmesi ile sağlanır. Kıvılcımla ateşlemeli motorlarda, hava kısıcı kullanılarak karışım oranları ayarlanır. Bu karışım oranları çok silindirli motorlarda, mutlaka birbirine yakın sınırlar içinde tutulmalıdır. Bu tip motorlarda oranların ayarlanması daha zor olduğundan her silindire müstakil vanalar yerleştirilmelidir. Biyogaz ve hava karışımı venturi tipi bir karıştırıcı ile sağlanmalı, gaz basıncı bir düşük basınç regülatörü ile kontrol edilmesi gerekmektedir [232].

Biyogaz içten yanmalı motorlarda kullanıldığında elektrik elde edilebildiği gibi, su pompalama gibi sistemlerde de mekanik tahrik olarak kullanılabilir [235]. Fakat motorların biyogaz sistemine uzak kalması ve sistemlerde kullanılan gaz depolama ünitelerinin küçük olması bu kullanımı zorlaştırmaktadır [68]. İçten yanmalı motorlarda 1 kWh enerji için yaklaşık 0,45-0,8 m³ biyogaza ihtiyaç vardır [40]. Biyogazın yakıt olarak yüksek basınçta depolandığı ve içten yanmalı motorlarda kullanıldığı uygulamalarda, güvenlik nedeniyle sistemde emniyet vanası, hızlı kapama vanası, çift cidarlı gaz borusu, ek pompa muhafazası, gaz kontrol pompası, gaz vanası kullanılmalıdır. Biyogaz hareketli ve sabit tarımsal makinalarda kullanılabilir [236].

Günümüzde çoğunlukla biyogaz içten yanmalı motorlarda yakılarak elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Yapılan küçük ölçekli deneylerde içten yanmalı motorların kapasite oranı 200 kW'tan daha düşüktür ve bunun % 25 daha az miktarda elektriğe dönüşmektedir [237]. Büyük motorlar bunun büyük bir kısmını yararlı elektriğe çevirebilir bir motor % 38 verimlilikle biyogazı 600 – 1000 kW arasında yararlanılabilecek elektriğe çevirebilirler [238].

Özel dizayn edilmiş biyogaz motor çeşitleri;

- Dört zamanlı dizel motor,
- Dört zamanlı ateşlemeli motor,

Birçok ülkede otobüslerde ve diğer taşıma araçlarında dizel motorlara alternatif enerji ve çevreci olarak bakılmaktadır. Biyogazın kullanıldığı motorların gürültü seviyesi dizel kullanılan motorların gürültü seviyesinden düşüktür bu pozitif bir sebeptir, ayrıca egzoz gazının emisyonu dizel motorların egzoz gazının emisyonundan çok daha düşüktür ve nitrojen oksit emisyonu çok düşüktür [239].

Düzgün ekipmanların kullanılması ve yakıt-hava karışımının doğru olarak ayarlanması durumunda, biyogaz kullanımı motorun aşınmasını ve bakım giderlerini diğer konvansiyonel sıvı yakıtlara göre düşürmektedir. Biyogazın içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımındaki avantajlar, tam yanma, yağlama yağlarının özelliklerini bozmama ve vuruntuya neden olmamaktır [240].

Üretici firmalar, biyogazın benzinli motorlarda kullanımında, haftada bir kere yağ ve filtre değiştirilmesini önermektedirler. CO₂'si giderilmiş biyogaz, yüksek oktan oranıyla, içten yanmalı motorlar için uygundur. Silindirlerde ve pistonlarda, karbon atıklarına neden olmaz. Kalıntıya neden olmadığı için yağ değiştirme süreleri uzar. Yağı sıvı yakıtların kullanımında olduğu gibi seyreltmediği için motor ömrünü uzatır. İçerisinde tetra etil bulunmadığı için havayı kirletmez. Benzine göre havayla daha iyi karıştığından, daha kaliteli ve temiz yanma sağlar [234]. Metan kullanılan içten yanmalı motorlarda bakım giderleri dizel kullananlara göre % 40-50 düşmektedir [241]. Fakat bazı

çalışmalarda, yzeylerde karbon birikmesi ve yağ asitliğinin artması gibi sorunlar rapor edilmiştir [242].

Araştırmalarda, benzinli motorlarda biyogaz kullanıldığında, sıkıştırma oranının 1:4–1:16 arasında değiştirilebildiği görülmüştür. Yanma, l noktaya % 30 kala başlatılır. Hava yakıt oranı 1:10’dur. Biyogaz, yağlama sorunu yüzünden, iki zamanlı motorlarda kullanıma uygun değildir fakat kullanılmaktadır. Biyogaz dizel motorlarda kullanım için oldukça elverişlidir. Genellikle motorinle birlikte kullanılır. Dizel motorlarda kullanımda, yüksek sıkıştırma oranına bağlı olarak daha yüksek verim alınabilmektedir. Yüksek sıkıştırma oranı verimi arttırırken, motor ömrünü de gerilimden dolayı düşürür. Ayrıca sıkıştırma oranının düşürülmesi, NOx emisyonunu azaltırken performansı düşürür. Bu performans düşüşünü engellemek için motor n yanma odalı olarak oluşturulur [243].

Besleme materyaline bağlı olarak biyogaz içerisinde amonyak miktarı 450 ppm’e kadar çıkabilmektedir. Bu amonyak içten yanmalı motorlarda NOx emisyonunun artmasına neden olur. Ayrıca yakıt hücrelerinde kullanımda sistem ömrünün azalmasına neden olur. Bu nedenle özellikle azot yönünden zengin hammaddelerin kullanıldığı durumlarda serbest amonyak miktarının izlenmesi gereklidir [68]. Biyogazla alıştırılan içten yanmalı motorlarda hava-yakıt oranı artırıldığında NOx ve CO emisyonları düşürülmekte, fakat verim azalmaktadır [244].

Biyogazın içerisinde CO₂ bulunması nedeniyle motor performansı düşmekte fakat NOx emisyonu azalmaktadır [245]. CO emisyonu daha yüksektir ve biyogaz içerisinde H₂S bulunması yüzünden katalizör kullanarak bu emisyonu düşürmek zordur. Fakat CO, NOx’e göre daha problemsiz bir gazdır. Çünkü çok hızlı bir şekilde okside olarak CO₂’e dönüşür ve doğal karbon çevrimine dâhil olur [246]. Bu motorlarda, yağ değişimi için pH değerine bakılır. Kullanılan yağın hızlı bir şekilde asitide olması, H₂S’in yüksek oranda olduğu ve arıtılması gerektiği anlamına gelmektedir. Biyogazın motor performansına etkileri, motor test dinamometresi yoluyla bulunur. Biyogaz içerdiği CO₂’in tamponlama etkisi ile dizel motorlardaki vuruntu sesini önlemektedir. Enjektörde oluşabilecek sorunları engellemek için biyogazla karışımda motorinin alt oranı, yaklaşık % 20 olmalıdır [51].

Benzinli motorlar, dizel motorlara göre H_2S 'e karşı daha hassasdır [246]. Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımında, üretici firmalar H_2S oranının 10 ppm'in altında, egzoz sıcaklığının ise yoğunlaşma olmaması için, 88 °C'nin üzerinde tutulmasını önermektedirler [51]. Biyogaz kullanıldığında % 10 civarında H_2 eklenmesi, yanma oranını artırmakta ve bu yüzden hidrokarbon emisyonunu düşürerek motor performansını artırmaktadır [210].

Durma ve kalkma sırasında düşük sıcaklıklar nedeniyle oluşabilecek yoğunlaşmanın, gaz içerisindeki korozyif bileşikler nedeniyle oluşturacağı korozyonu engellemek için, motor durdurulduğunda ya da biyogaz bittiğinde, bir dakika süresince diğer bir yakıtın kullanılması bir çözümdür [247].

Taşımacılıkta biyogazın yakıt olarak kullanımı, İsveç şartlarında araştırılmış ve özellikle kırsal kesim için ekonomik olarak diğer yakıtlara alternatif olabileceği bulunmuştur [248]. Taşıtlarda kullanım, doğal gazla çalışan motorlarda mümkündür. Bu tip kullanımda biyogazın arıtılması gerekmektedir. Bunun nedenleri;

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

Uygulamalarda genellikle, metan oranının % 95 üzerinde olduğu arıtım sistemleri kullanılmaktadır [246]. Avrupada 1996 yılında başlatılıp 2000 yılında tamamlanan ZEUS (Zero and Low Emission Vehicles in Urban Society) projesi kapsamında, kanola metil esteri (biyodizel), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), elektrik ve etanol kullanan araçların yanısıra biyogaz ile çalışan 3'ü kamyon, 45'i minibüs ve geri kalanı otomobil olmak üzere 223 araç faaliyete geçmiştir [249].

4. MATERYAL ve METOT

4.1. Çalışmanın Amacı

Enerji gerekliliği dünya nüfusunun artması, gelişen teknoloji ve fosil kökenli yakıtların bitme noktasına gelmesinden dolayı alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları önemini arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri de biyokütleden elde edilmekte olan biyogazdır. Biyogaz; organik atıkların anaerobik ve/veya aerobik fermentasyonu sonucu elde edilmekte ve özellikleri bakımından doğalgaza benzeyen yanıcı bir gazdır. Biyogaz tesislerinde çevresel sorunlara neden olan organik atıkları havasız ortamda fermentasyona tabii tutulduktan sonra oluşan biyogaz ve fermente olmuş gübrenin birçok kullanım alanı vardır. Bu kullanım alanlarından bazıları şu şekildedir;

- Taşıt yakıtı olarak kullanılmasında,
- Doğalgaz sistemlerinde doğalgazın yerine yakıt olarak kullanılmasında ve doğalgazın içerisine belli oranlarda enjekte edilmesinde,
- Yüksek oranlarda ısı ve elektrik enerjisi üretilmesinde,
- Kimya endüstrisi için hammadde olarak kullanılmasında,
- Bitkilerin kullanımına elverişli formda yüksek azot içeriğine sahip organik gübre kullanımına olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı da tavuk gübresinden biyogazın üretilmesi, üretildikten sonra elde edilen gazın içeriğindeki yanıcı olmayan CO₂ ve H₂S'ten ayrıştırılıp benzinli motorlarda kullanılabilirliğini araştırmaktır.

4.2. DeneySEL Çalışmalar

Bu çalışmada kullanılmak üzere tavuk gübresi Elazığ'da bulunan Özüğür Tavuk Çiftliğinden ve aşı Elazığ Belediyesi Elazığ atık su arıtma tesisinden temin edilmiştir. Tavuk çiftliğinden temin edilen gübre içerisindeki toprak parçaları ezildi, uzun saman, ot parçaları ve içerisindeki çakıllar ayıklandı. Tavuk gübresi 600 g/l litresi 1:2,5 oranında sulandırılarak Şekil 4,1'de görülen el matkabına göre dizayn edilen bir karıştırıcı ile düşük

hızda homojenlik kıvamına kadar 15 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 4.1. Atığın hazırlanması için el matkabına göre dizayn edilmiş karıştırıcı

4.3. Biyogaz Reaktörü

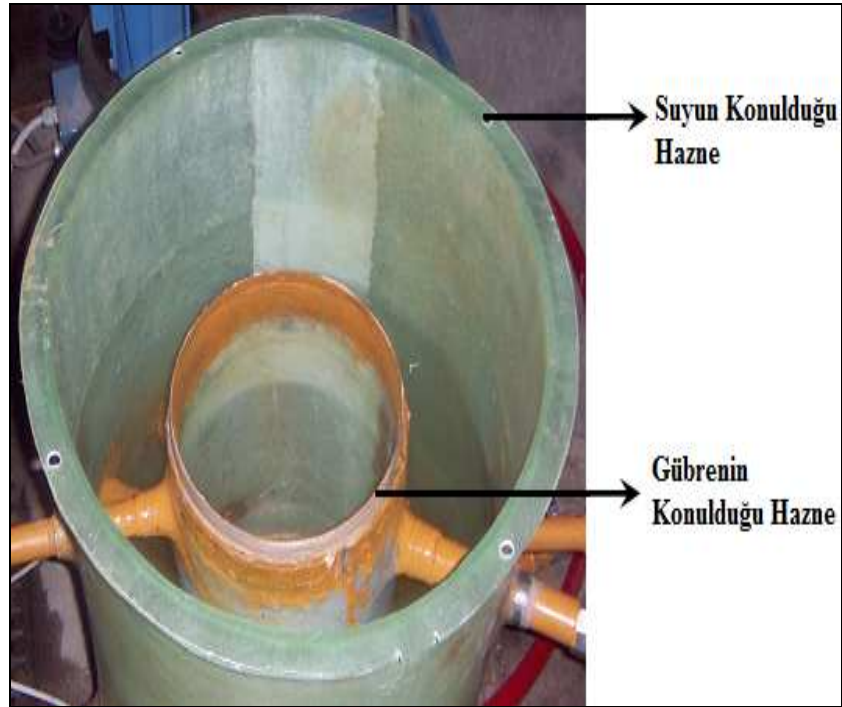
Biyogaz eldesi için kesikli beslemeli tip reaktör tasarlanmıştır. Besleme materyali reaktöre bir kere doldurulup gaz çıkışı bitene ya da azalana kadar beklenmiştir. Daha sonra boşaltılarak tekrar yeni materyal eklenmiştir. Şekil 4.2’de biyogaz elde etmek için kullanılan reaktör görülmektedir.



Şekil 4.2. Biyogaz üretimde kullanılan fermentör.

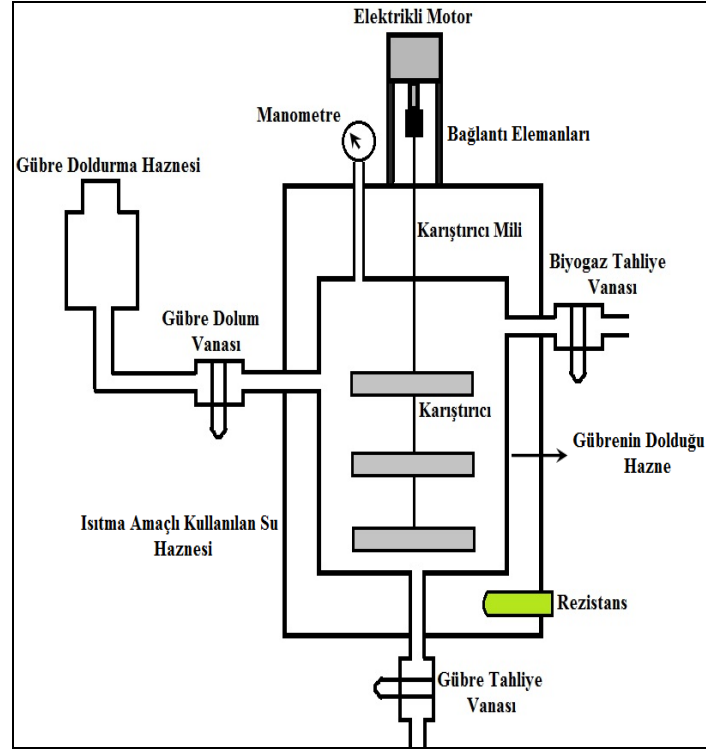
Deneyde kullanılmak için tasarlanmış olan reaktör 5 mm et kalınlığına sahip polyester malzemeden yapılmıştır. Biyogaz reaktörünün polyester malzemeden yapılmasının sebebi uzun süre kullanılacak olan reaktörün paslanmasının önüne geçmektir. Ayrıca Şekil 4.3'te görüldüğü gibi metal olan bağlantı borularında da paslanmanın önüne geçebilmek için üzerleri polyester malzeme ile kaplanmıştır. Biyogaz üretmek için tavuk gübresinin konulduğu hazne toplam 16 l hacmindedir. Ayrıca gübreyi sabit sıcaklıkta tutmak için ısıtma suyunun konulduğu hazne 200 l hacminde yapılmıştır.

Biyogaz reaktöründe tavuk gübresinin anaerobik fermentasyona uğratıldığı gübre haznesinin sıcaklığını mezofilik sıcaklık sınırında (32 – 42 °C) tutmak için 2000 W gücünde bir rezistans, suyu ısıtmak amacı ile kullanılmıştır. Su ve gübrenin konulduğu hazneler Şekil 4.3'teki gibidir.



Şekil 4.3. Isıtma amaçlı kullanılan suyun ve gübrenin konulduğu hazneler

Şekil 4.4'te şematik olarak görüldüğü gibi reaktörün iç basıncını ölçmek için bir manometre ve su + gübre karışımını doldurmak, fermente olmuş gübreyi boşaltmak için küresel vanalar kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Biyogaz reaktörü

4.4. Biyogaz Reaktörünün Sıcaklığının Sabit Tutulması

Anaerobik fermentasyon için en uygun sıcaklık aralığı 32 – 42 °C (mezofilik sıcaklık sınırları) olduğu için biyogaz reaktörünün sıcaklığını 32 – 42 °C aralığında tutabilmek için dijital bir termostat kullanılmıştır.

Biyogaz reaktöründe tavuk gübresinin anaerobik fermentasyona uğratıldığı gübre haznesinin sıcaklığını mezofilik sıcaklık sınırında tutmak için 2000 W gücünde bir rezistans suyu ısıtmak amacı ile kullanılmıştır. Dijital termostat bir sıcaklık sensörü vasıtası ile rezistansın ısıtmış olduğu suyun sıcaklığını algılayıp seçilmiş olan sıcaklık değerine ulaştırdıktan sonra rezistansa giden elektrik akımını kesme görevini yerine getirmek için kullanılmıştır.

Fermentörlerde sıcaklığın ani olarak değişmesi bakterilerin faaliyetlerini olumsuz yönde etkiler. Mezofilik şartlarda metan bakterisi faaliyetlerinin olumsuz yönde etkilenmemesi için literatür araştırmasına göre sıcaklık değişimi saatte ± 1 °C olması gerektiği belirtilmektedir. Kullanılan dijital termostat ve sensörü vasıtası ile sıcaklık

değişiminden metan üreten bakterilerin en asgari seviyede etkilenmesi sağlanmıştır. Kullanılan dijital termostat Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil. 4.5. Elektronik kontrol ünite

4.5. pH Değerinin Optimum Değere Getirilmesi

Fermentörün içerisindeki asit oluşturuıcı bakteri konsantrasyonunda artma olduğu zaman konsantrasyonun pH'ı asitliğe doğru kaymaktadır. Fermentörde yağ asidi konsantrasyonu belli değerin üzerine çıktığında metan oluşumu tamamen durur. Metan üreten mikroorganizmalar için optimum pH 6,7-7,5 aralığındadır.

Fermentöre doldurulacak olan gübre ve su karışımı doldurulmadan önce ve doldurulduktan sonra materyalin pH'ı ara ara pH metre kağıtları ile ölçülerek optimum değer olan pH 6,7 - 7,5 aralığında bir değere getirilmeye çalışılmıştır. Eğer pH değeri 6,7 – 7,5 aralığında olmadığı durumlarda pH'ı yükseltmek için Şekil 4.8' de görülen sönmüş kireç veya karbonat kullanıldı.



Şekil 4.6. pH değerini yükseltmek için kullanılan materyaller

Şekil 4.7’de 7 gün sonra fermentör içerisindeki çözeltinin pH değeri 6,3 olarak tespit edildiğinden dolayı pH değerini yükseltmek için sönmüş kirecin eklenmesi görülmektedir.



Şekil 4.7. pH değerini yükseltmek için sönmüş kireç eklenmesi

4.6. Fermentöre Eklenen Aşı Madde

Havasız ortam koşullarında organik atıkların parçalanması ve biyogaz üretimi kendiliğinden başlar. Ancak işletilmekte olan başka bir tesisten alınan çamur (aşı) yüksek mikroorganizma içermesi nedeni ile yeni çalışacak tesisin işletmeye alınma sürecini kısalttığından dolayı Elazığ atık su arıtma tesisinden temin edilen aşı Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Fermentöre Eklenen Aşı

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda organik yükleme hızına göre hidrolik bekletme süresi 20 – 25 gün tutulmuştur.

4.7. Çürütücü İçerisindeki Substratın Karıştırılması

Fermentör içerisindeki tavuk gübresi + su çözeltisinin karıştırılması için dakikada 25 devir yapabilen bir elektrikli motor kullanılmıştır. Düşük devirli motor kullanılmasının sebebi; Aşırı ve hızlı karıştırma sonucunda birbirleriyle ilişkili bakterilerin teması kaybolmakta, işlevlerini yerine getirememelerinden biyogaz üretim veriminin düşmesinden

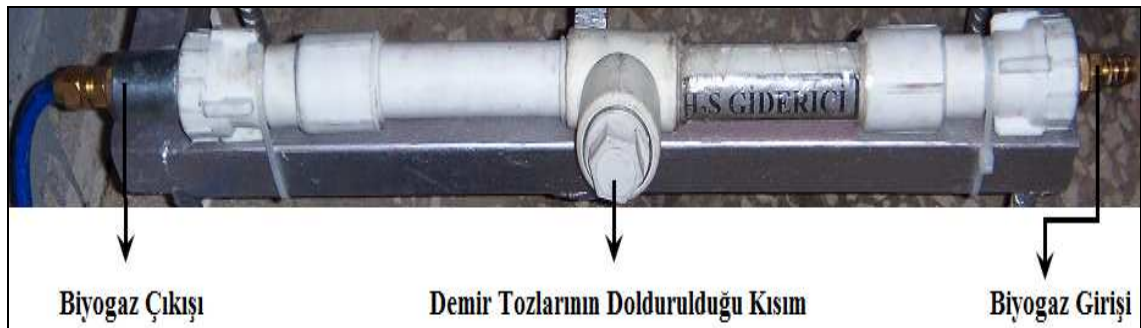
kaynaklanmaktadır. Ayrıca elektrik motoruna bağlanan karıştırıcıyı 6 saatte bir 4 dakika çevirmesi için Şekil 4.9’da görülen zamanlayıcı sisteme eklenmiştir.



Şekil 4.9. Elektrik motorunu tetikleyen zamanlayıcı

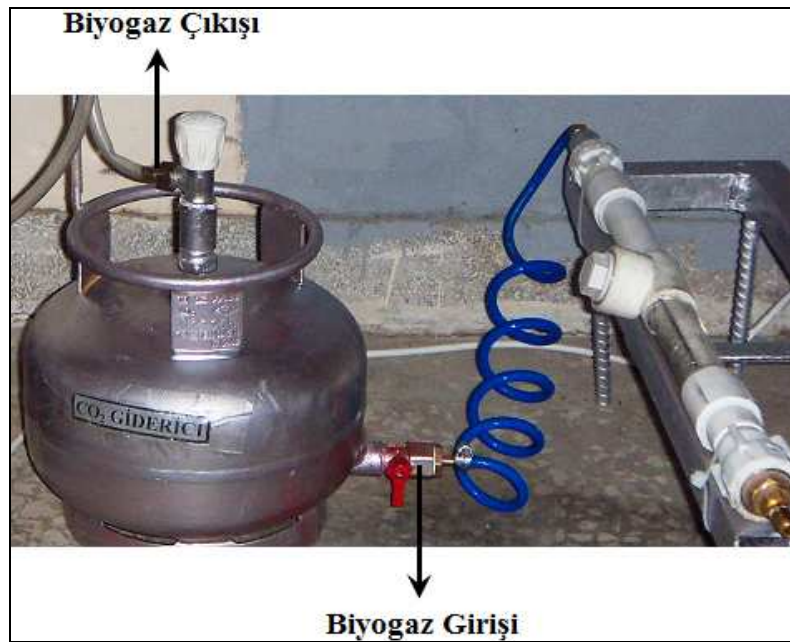
4.8. Elde Edilen Biyogazın İçerisinden CO₂ ve H₂S’in Ayrıştırılması

H₂S biyogaz üretimi için kullanılan organik materyal ne olursa olsun mutlaka elde edilen biyogazın içerisinde mevcuttur. Çok düşük konsantrasyonlarda bile sistemin inhibe olmasına ve elde edilen biyogazın kullanımını sınırlandırdığı için muhakkak arıtılması gerekmektedir. Elde edilen biyogazın arıtılması için Şekil 4.10’da görülen ve içerisinde demir tozu bulunan kolon kullanılmıştır.



Şekil 4.10. H₂S gideriminde kullanılan demir tozu kolonu

Biyogaz reaktöründe oluşan gazın dolduğu 10,7 l'lik boş hacime biyogaz oluşup doldukça ekovat aracılığı ile bir boş tüpe depolanmıştır. Biyogazın depolandığı tüpün hacmi 26,2 l olup 4 bar basınca kadar biyogaz depolanmıştır. Depolanan biyogazın basıncı 4 bar olduktan sonra Şekil 4.11'de görülen ve içerisinde su bulunan tüpe biyogaz geçişi olması için küresel vanalar açılmıştır. Belli bir basınca sahip olan biyogaz su içerisinde geçerek CH_4 'ten sonra en büyük orana sahip olan CO_2 'i su içerisine bırakıp tüpün boş olan hacminde toplanmıştır. Çünkü gazların sudaki çözünürlükleri farklıdır ve CO_2 CH_4 'ten daha fazla çözünür.

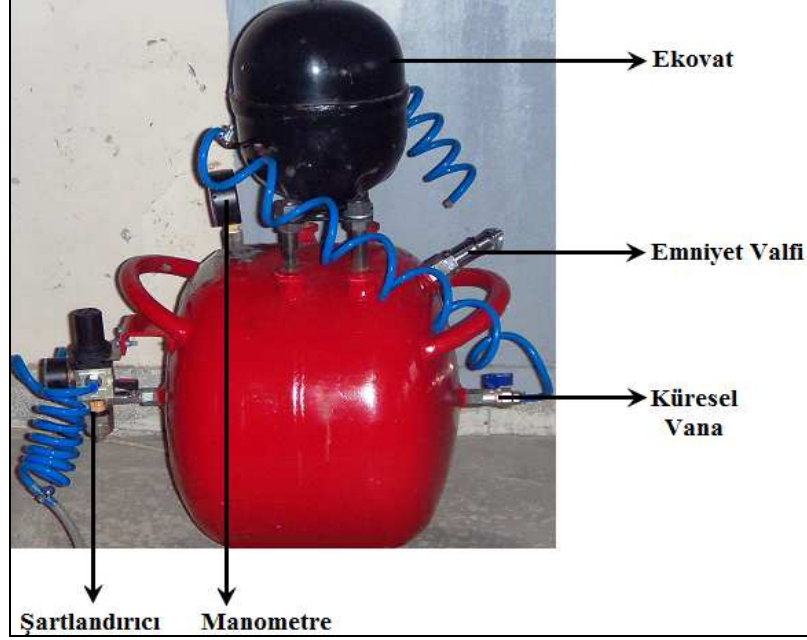


Şekil 4.11. CO_2 giderimi için kullanılan içerisinde su bulunan tüp

4.9. Elde Edilen Biyogazın Depolanması ve Nem Giderimi

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi elde edilen gazı 26,2 l'lik hacime 4 bar basınç altında sıkıştırmak için bir ekovat kompresörü kullanılmıştır. Ayrıca biyogaz depolama ünitesinin gaz çıkış vanasına bir şartlandırıcı bağlanmıştır. Şartlandırıcı birimi içerisinde bulunan filtre aracılığı ile elde edilmiş olan biyogazın kullanım aşamasına kadar kirlenmesinin önüne geçmesi sağlanmıştır. Filtreler, katı partiküllerin yanı sıra su tutma görevi de görmüştür. Filtrenin su tutma görevi görebilmesi için gazın filtre kabı içine girmesi

sırasında gaza dönme etkisi kazandırılır. Dönerek kap içine giren gaz, kabın çeperlerine çarpar ve bünyesindeki nemi bırakır.



Şekil 4.12. Biyogaz depolama ünitesi

Ayrıca filtre kabı içerisine daha sağlıklı bir nem giderimi gerçekleştirilmesi için Şekil 4.13’de görünen silika – jelde konmuştur.



Şekil 4.13. Filtre kabına konan silika – jel

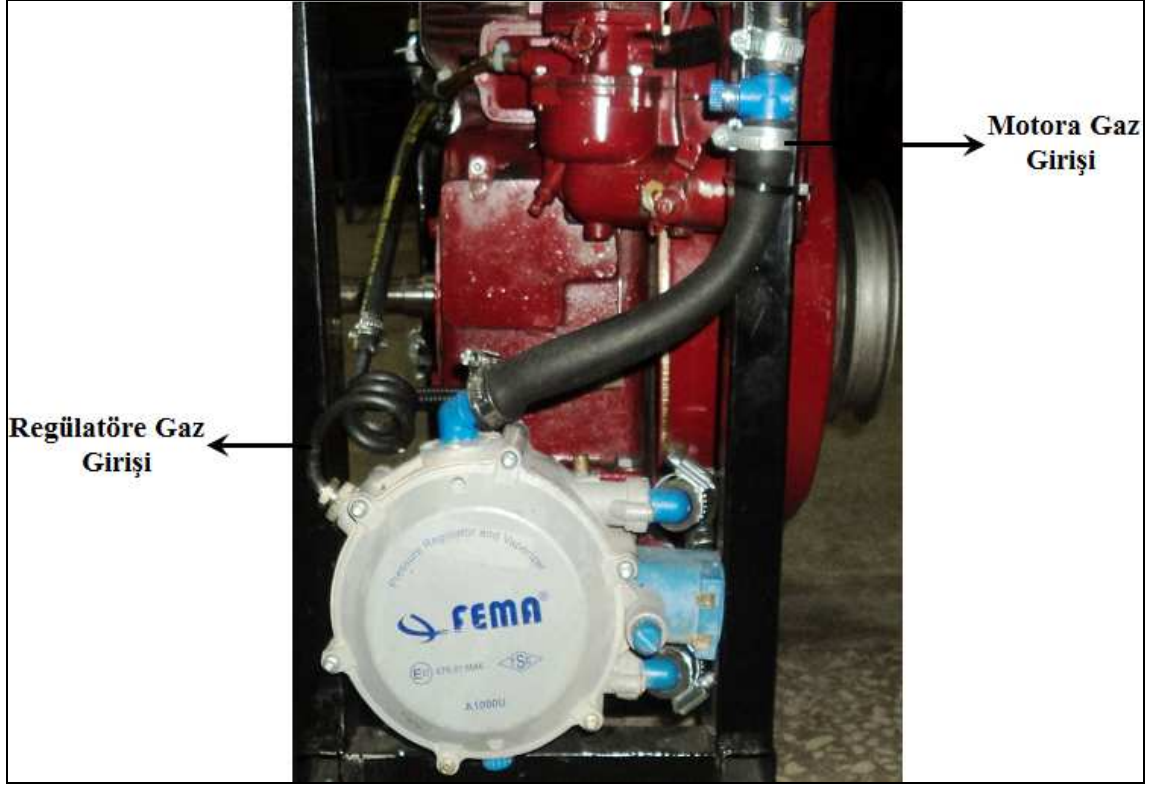
Gaz ihtiyacının zaman zaman artması ve azalması, çalışma basıncının düşmesine neden olur. Değişik gaz basıncı aralığında çalışan cihazlar için kuvvet kayıpları gibi istenmeyen durumların meydana gelmemesi için düzenli basınçta gaz göndermek ve kullanım yerindeki çalışma basıncını sınırlamak amacıyla basınç ayarlayıcı adı verilen devre elemanı kullanılmıştır. Basınç ayarlayıcı yalnız başına kullanılabildiği gibi yer kaplamaması için üretici firmalar tarafından filtrelerle birlikte de üretilirler. Şekil 4.14'te biyogazın çıkış kısmına bağlanmış olan bir şartlandırıcı ve filtre görülmektedir.



Şekil 4.14. Biyogaz çıkış vanasına bağlanan filtre ve şartlandırıcı

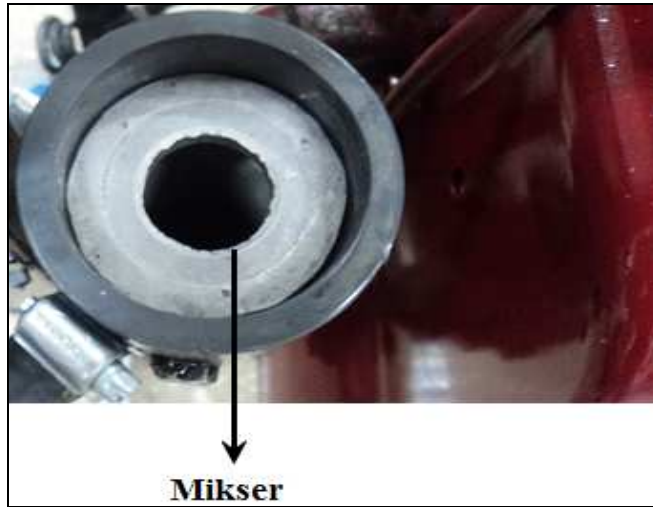
4.10. Benzinli Deney Motorunun Biyogaz Motoruna Dönüştürülmesi

Tek silindirli 4 zamanlı buji ile ateşlemeli deney motorunu biyogaz ile çalışır duruma getirmek için Şekil 4.15'de görülen regülatör takılmıştır. Deney motorumuz hava soğutmalı olmasına rağmen regülatörün takılmasının sebebi depodan gelen biyogazı atmosferik basınç seviyesine düşürüp yakıtın motor tarafından emilmesini sağlamaktır.



Şekil 4.15. Deney motoruna takılmış olan regülatör

Regülatör çıkışında bir vakum ortamı oluşturup yakıtın emilmesini kolaylaştırması ve hava-yakıt karışımının ayarlaması için takılmış olan mikser Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16. Deney motoruna takılmış olan mikser

Deneylerde Şekil 4.17’de görünen tek silindirli dört zamanlı, sıkıştırma oranı 8:1 ve Max. Devirde 3,6 kW güç üreten buji ile ateşlemeli, hava soğutmalı Cussons marka motor kullanılmıştır.



Şekil 4.17. Elde edilen biyogazın yakıldığı deney motoru

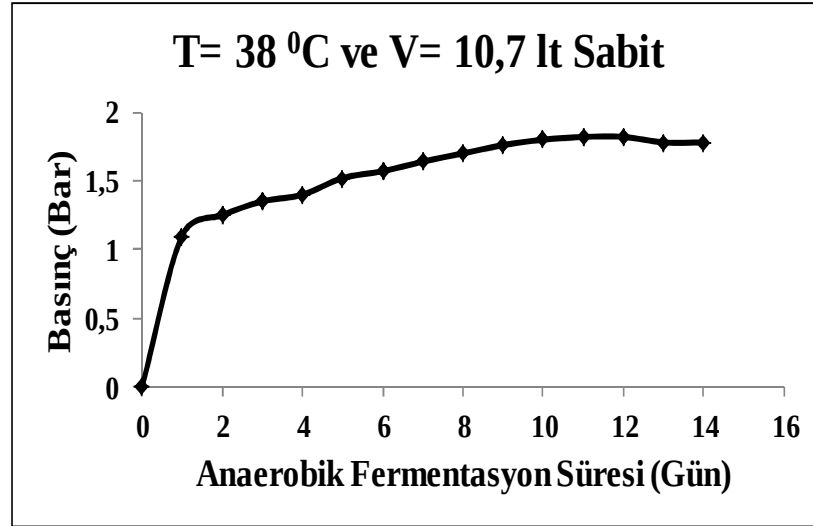
Biyogaz arıtılıp motorda yakıldıktan sonra ve arıtılmadan motorda yakılması sonucu atmosfere salınan emisyonların ölçümünün yapıldığı Ekotest gaz analizörünün özellikleri Tablo 4.1’deki gibidir.

Tablo 4.1. Ekotest egzoz gaz analizörü özellikleri

Parametre	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti
CO (% Vol)	% 0 – 9,99	% 0,01
CO ₂ (% Vol)	% 0 – 25,5	% 0,01
HC (ppm)	0 - 5000	1 ppm
O ₂ (% Vol)	% 0 - 22	% 0,01

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

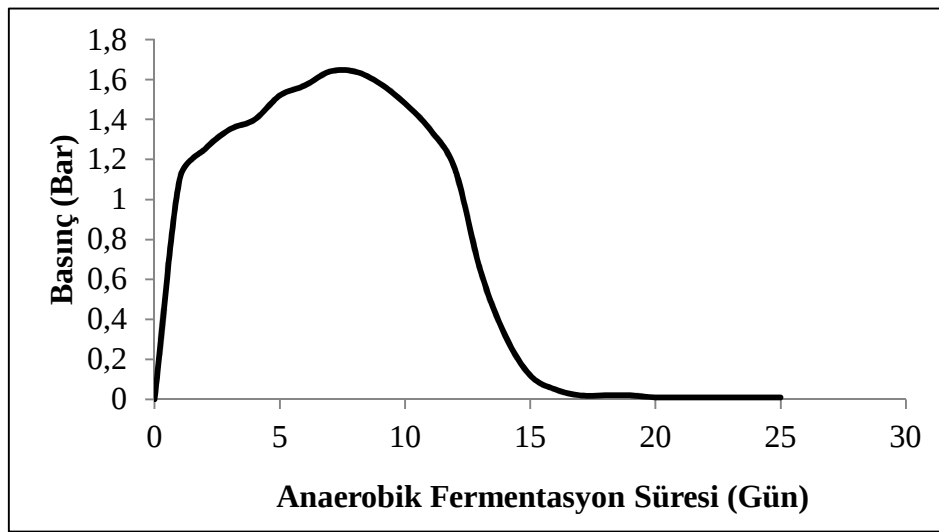
Deneyde tavuk gübresi 600 g/l, litresi 1:2,5 oranında sulandırılmış ve çözelti 37 °C sıcaklıkta havasız ortamda 14 gün bekletildiğinde 10,7 l sabit hacimde 14. günün sonunda 1,82 bar basınca sahip biyogaz elde edilmiştir. Biyogaz reaktörüne ilk besleme yapıldıktan sonra karıştırma hızı 6 saatte bir 4 dakika olacak şekilde 25 dev. / dk'da sabit tutulmuş, 14 gün boyunca reaktöre yeni materyal (tavuk gübresi + su çözeltisi) eklenmemiştir. Günlük olarak biyogaz reaktöründeki biyogaz oluşumu kaydedilmiş ve elde edilen biyogazın zamanla basınç değişimi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tavuk gübresinden elde edilen biyogazın basınç eğrisi

1. Günün sonunda biyogazın basıncını ölçmek için kullanılan manometrede 1,1 bar'lık basınç değeri okunduktan sonra elde edilen biyogaz günlük olarak yakılmaya çalışılmıştır. Ancak 5. Günün sonunda elde edilen biyogazın tutuştuğu gözlenmiştir. Fermentasyon tankının üzerindeki 10,7 l'lik sabit hacimde, fermentöre ilk materyal eklenmesi esnasında girmiş olan hava bir ekovat kompresörü vasıtası ile boşaltılmış olmasına rağmen içerisinde kalmış olan hava biyogazı seyreltmıştır. 5. Günün sonunda yanıcı olan CH_4 oranı biyogaz içerisinde artınca tutuşma gerçekleşmiştir.

Tavuk gübresi + su çözeltisi fermentöre yüklendikten 7 gün sonra dijital termostat arızalandığından dolayı sistemin sıcaklığı düştü. Yaklaşık olarak 11 gün sonra dijital termostatin yenisi getirildi ve sistem tekrar mezofilik sıcaklığa getirilip 1 hafta boyunca manometredeki basınç değişimi gözlenmesine rağmen biyogaz üretimi gerçekleşmedi. 20°C civarındaki sakrofilik sıcaklıklar, anaerobik fermantasyon için uygun bir sıcaklık değildir. Bu sıcaklık değerlerinde uzun zincirli yağ asitleri oluşup sistemde birikmeleri sonucu köpük oluşumuna neden olarak sistemi inhibe etmiş olabilirler. Şekil 5.2’de inhibe olan sistemin basınç değişimi görülmektedir.



Şekil 5.2. Sıcaklığın uzun süre düşmesi sonucu inhibe olan sistemin basınç değişimi

Deney motoru biyogaz ile çalıştırılmadan önce yaklaşık olarak 15 dakika motor çalışma sıcaklığına ulaşması için benzin ile çalıştırılmıştır. Motorun benzin ile çalışması süresince motor hızı, gaz kelebeği açıklığı değiştirilerek yükleme yapılmadan artırıldı. Motor yeterli sıcaklığa ulaştıktan sonra benzin vanası kapatılıp artırılmış biyogaz ile motor çalıştırılmıştır.

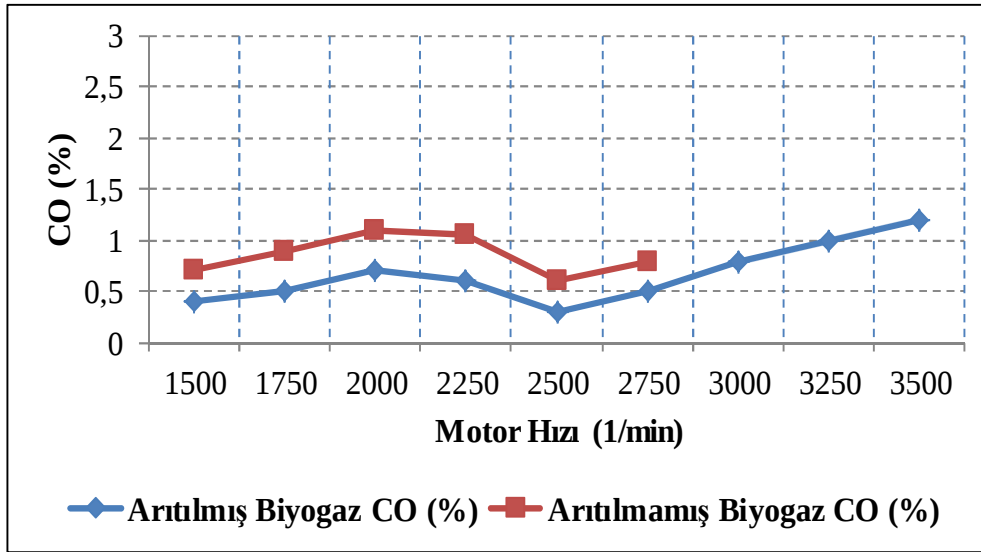
Yaklaşık olarak motor 4 dakika biyogaz ile çalışmada motor hızı, gaz kelebeği açıklığı değiştirilerek yükleme yapılmadan çalıştırılıp emisyonları ölçülmüştür. Artırılmış biyogaz ile emisyon ölçümleri bittikten sonra artırılmamış olan biyogaz ile emisyon ölçümleri alınmaya çalışılmıştır. Motor benzin ile çalıştıktan sonra artırılmamış biyogaz ile çalıştırılmaya başlandığı anda motor sarsıntılı (tekleyerek) çalışmıştır. Motorda rölanti

devrini geçmek için gaz verildiğinde motor stop etmiştir. Ancak motorun stop etmediği devirlerde arıtılmamış biyogaz için emisyon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çalışmada egzoz emisyonları, karbonmonoksit, hidrokarbon ve karbondioksit olmak üzere 3 grupta incelenmiştir. Egzoz emisyonlarına; yakıt cinsi, sıkıştırma oranı ve devir sayısı gibi faktörlerin yanısıra emisyonların üzerinde en etkili faktörün HFK olduğu gözlenmiştir.

Motorun, düşük ve rölanti devirlerinde gaz kelebeğinin çok az açık olması hacimsel verimin azalmasına neden olan çalışma devirleridir. Bu devirlerde hacimsel verimin azalmasının sebebi düşük motor devirlerinde emme havası veya emilen yakıt-hava (biyogaz + hava) karışımının hızına bağlı olarak emme gazlarının dinamik basıncından istifade edilemediği için hacimsel verim düşmektedir. Ayrıca motorun çalışma sıcaklığına ulaşması için yaklaşık olarak benzin ile 15 dakika çalıştırılması sonucu; emme ve egzoz supapları, emme kanalları, silindir cidarlarının sıcaklığının artmasına sebep olmuştur. Bu kısımların sıcaklığının artması sonucu kimyasal enerjiden mekanik enerji elde etmek için motora alınan biyogaz + hava karışımı bu elemanlar ile fiziksel olarak temas ettiğinden dolayı da hacimsel verimde azalmaya neden olmuştur. Hacimsel verimin yüksek olması için yakıtın silindir içerisinde işgal etmiş olduğu hacmin minimum olması elzemdir. Gaz fazında bulunan yakıtlar motorlarda enerji kaynağı olarak kullanımında bu gazların yoğunluklarının düşük olması nedeniyle motor hacimsel veriminde azalmaya sebep olmaktadır. Motoru rölanti devrinden daha yüksek devirlerde çalıştırabilmek için gaz kelebeğinin konumunun kapalı konumdan açık duruma getirilmesi gerekmektedir. Gaz kelebeği daha açık konuma getirilince hava akışını sınırlandıran aerodinamik sürtünme dirençlerinin asgari seviyeye inmesi sonucunda hacimsel verim daha da iyileşmektedir.

Yanma teorik tam yanma şeklinde gerçekleştirildiğinde yanma ürünleri olarak karbon dioksit CO_2 ve H_2O elde edilir. Ancak içten yanmalı motorlarda, yanma odasındaki sıcaklık, basınç, oksijen konsantrasyonu ve zaman, yanmayı ve yanma ürünlerini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle yanma ürünleri içerisinde, yanma şartlarına bağlı olarak yanmamış HC, CO, CO_2 ve NO_x gibi hava kirliliğine sebep olan bileşenler de bulunabilmektedir. Dolayısıyla hava kirliliğinin oluşmasındaki temel sebeplerin başında yanma olayları gelmektedir [250].

İçten yanmalı motorlarda CO emisyonu, kullanılmayan kayıp kimyasal enerjiyi açıkladığı için önemli bir parametredir. Bu parametre eksik yanma sonucu oluşmaktadır. Gaz sıcaklığının düşük olması, CO₂'e dönüşümü için yeterli oksijenin ve zamanın olmaması CO emisyonlarını artırır [251]. Yanma ürünleri arasında CO emisyonu bulunmasının temel sebebi oksijen yetersizliğidir. Oksijen yetersizliği yanma odasının bütününe olabileceği gibi karışımın homojenliğinin sağlanamaması nedeniyle bölgesel de olabilir. CO oluşumu büyük ölçüde hava/yakıt oranına bağlı olmakla birlikte sıcaklık faktörü de etkilidir. Düşük sıcaklıklarda reaksiyon hızlarının azalmasıyla birlikte fakir karışımlarda da CO'nun CO₂'ye dönüşümü gerçekleşemez [250,252-256]. Ayrıca arıtılmamış biyogaz içerisinde yanıcı olmayan nem ve CO₂ bulunması da yanmanın verimsiz bir şekilde gerçekleşmiş olmasına neden olmuş olabilir. Arıtılmış ve arıtılmamış biyogazın yanması sonucu oluşan CO değeri farklı devirler için Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi en düşük CO emisyonu arıtılmış biyogaz için % 0,3 arıtılmamış biyogaz için % 0,6 olarak ölçülmüştür.

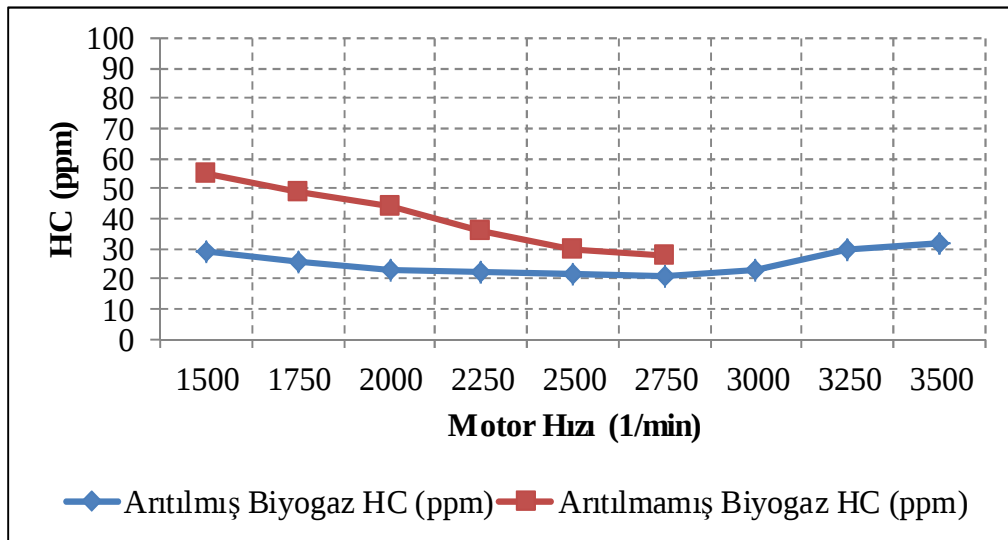


Şekil 5.3. Biyogaz yakıtının CO emisyonuna etkisi

Düşük devirlerde CO emisyonunun yüksek olmasının nedeni gaz keleşinin çok az açık olması, gaz sirkülasyon hızlarının yavaş olması hava/yakıt oranının yanma için optimum değerlerde olmamasından kaynaklanmış olabilir. Çok yüksek devirlerde ise yanma için gerekli olan zamanın çok kısılmasından ötürü CO emisyon değerleri artmış olabilir.

Yanma odasında tam yanma olayının gerçekleşmemesi egzoz gazları içerisinde yanmamış hidrokarbonların yer almasına sebep olmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar, sıcaklığın, oksijen konsantrasyonunun veya zamanın yetersiz olması sonucunda oluşmaktadır. Zengin karışımlarda oksijen yetersizliği, fakir karışımlarda ise; yanma odası sıcaklığının azalması HC emisyonunun artışına sebep olmaktadır. Ayrıca silindir cidarlarındaki ısı kayıpları nedeniyle oluşan ve alev sönme bölgesi olarak adlandırılan bölgeye ulaşan alevin sönmesi de HC emisyonu oluşumu nedenidir [250,252-254,257].

Yaklaşık olarak motora giren yakıt miktarının %1-1,5'ini HC emisyonları oluştururlar. Yanma odasını çevreleyen dar boşlukların sıkıştırma esnasında yakıt-hava karışımı ile dolması, yakıtın yağ tabakaları içinde absorpsiyonu, kalıntıların yağ filmi etkisi göstermesi, silindir içinde sıvı yakıt kalması ve supap yatak boşluklarında karışım sızması şeklindeki mekanizmalarda en önemli diğer HC kaynaklarıdır. Yanma odası içinde bulunan çok küçük hacimli bölgelere, hava ve atık gazlar girebilmekte iken bu küçük hacimler içinde alevin ilerlemesi mümkün olmadığı için, bu boşlukların yanmamış HC oluşumuna önemli katkısı vardır [258]. Arıtılmış ve arıtılmamış biyogazın yanması sonucu oluşan HC değeri Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi en düşük HC emisyonu arıtılmış biyogaz için 21 ppm arıtılmamış biyogaz için 28 ppm'dir.

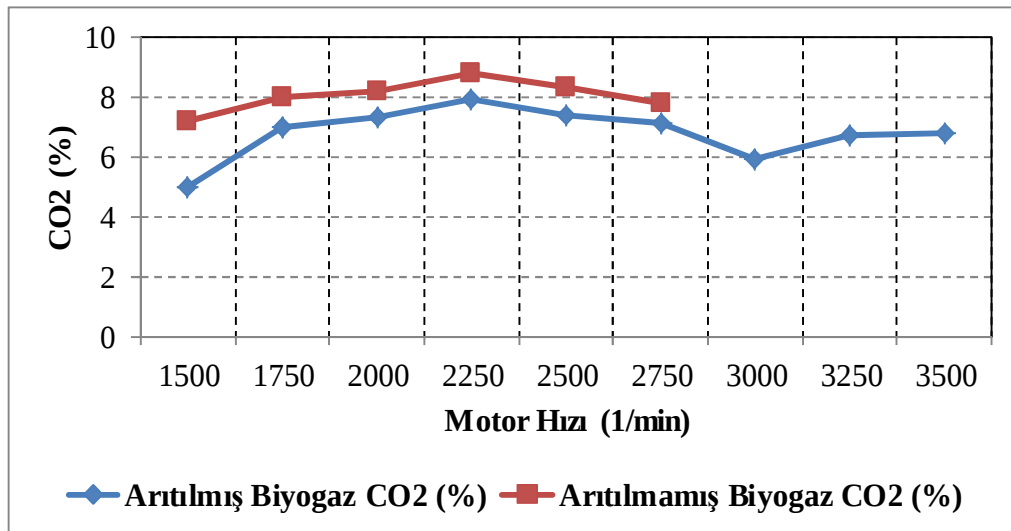


Şekil 5.4. Biyogaz yakıtının HC emisyonuna etkisi

Rölanti devrinde motor çalışmasında eksik yanma ve çok düşük silindir basıncının oluşturduğu düşük yanma hızları nedeniyle HC emisyonları fazla olabilir. Motor çok

yüksek devirlere çıktıkça HC emisyon miktarının artması karışımın zenginleşmesi, yanma için gerekli olan sürenin ksalmasından kaynaklanıyor olabilir.

Yakıtın motor içinde yanması sonucu belli bir miktar karbondioksit oluşur. Taşıtlardan kaynaklanan gaz emisyonları içinde en zararsızlarından biri olarak görülmekte ise de global ölçekte atmosferde karbondioksitin sürekli olarak artması iklim değişikliklerine neden olmaktadır. CO₂ 'in artışı ile güneşten kaynaklanan uzun dalga boylu radyasyonun tekrar uzaya yansması engellenmekte ve yeryüzünün sıcaklığı sürekli olarak artmaktadır. Karbondioksit miktarı kullanılan yakıt miktarı ile kontrol edilebilir. Yani havadaki karbondioksit emisyonunun ekstra kontrolüne gerek yoktur. Ancak motorlarda tam yanma sağlanmalıdır. Aksi halde karbondioksitin yerini CO alır, nitekim bu da istenmez [258]. Gaz sıcaklığının yüksek olması, CO₂'e dönüşümü için yeterli oksijenin ve zamanın olması CO₂ emisyonlarını arttırıcı unsurlardandır. Kısacası yanmanın tam olarak gerçekleşmemesi CO₂ yoğunluğunda azalma eğilimi göstermesine, Oksijen konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak CO₂ emisyonu artış göstermektedir. Arıtılmış ve arıtılmamış biyogazın yanması sonucu oluşan CO₂ değeri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi en düşük CO₂ emisyonu arıtılmış biyogaz için % 5,9'dur, arıtılmamış biyogaz için % 7,8'dir.



Şekil 5.5. Biyogaz yakıtının CO₂ emisyonuna etkisi

Fosil kökenli yakıtlar motorlarda yakıt olarak kullanıldığı zaman arıtılmamış biyogaz için CO₂ eğrisinin arıtılmış biyogaz için olan CO₂ eğrisinin altında olması beklenirdi. Ancak arıtılmamış biyogaz içerisinde biyogazın kalorifik değerini düşüren yanıcı olmayan bileşiklerin bulunmasından dolayı yanma sonu sıcaklık düşüktür. Sıcaklığın düşük olması yüksek sıcaklıklarda CO₂'nin parçalanıp CO + 1/2O₂ oluşturmaya engel olmuş olabilir.

Biyogaz yakıtının karbon hidrojen oranının fosil kökenli yakıtlara göre düşük olması ve gaz fazındaki biyogazın havayla homojen bir şekilde karışarak verimli yanması sonucu daha düşük CO, HC ve CO₂ emisyonları oluşmasının en büyük sebeplerinden biri olarak düşünülebilir. Ancak sıkıştırılmamış biyogaz ile hatırı sayılır kayda değer bir mesafe kat edilemez. Biyogaz taşıtlarda kullanılacak ise; düşük kalorifik ısı ve yüksek sıvılaştırma basıncı ile depolamada meydana gelen bazı problemlerin çözülmesi gerekmektedir.

Biyogaz enerjisi oldukça avantajlı bir enerji türü olup, hemen hemen hiçbir dezavantajı bulunmayan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Çünkü biyogaz tesisi kurulduğunda çevreye ve insanlara hiç bir zarar ve rahatsızlık vermez. Biyogaz üretilip kullanım alanının genişletilmesi için biyogaz içerisindeki asıl enerji kaynağı olan Metan (CH₄) oranının artırılması gerekmektedir. Biyogazın enerji seviyesinin yükseltilmesi (zenginleştirme), nakledilebilir hale getirilmesi, taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilmesi, doğal gaz ile belli oranlarda karıştırılabilmesi, ısı ve elektrik üretiminde verimli şekilde yararlanılabilmesi için içinde enerji seyreltici olan, basınç altında depolama güçlüğü oluşturan ve nakil sistemlerinde korozyona neden olan maddelerden arındırılması gerekmektedir. Biyogazın depolama, kullanım ve nakliyesinde problemler oluşturan ana bileşenler H₂S, H₂O, CO₂'dir. Biyogaz arıtdıktan sonra; piyasada bulunan ve LPG ile çalışan cihazların, küçük modifikasyonlarla biyogazla çalışır hale getirilebileceği, pişirme, sıcak su hazırlama, ısınma gibi amaçlarla kullanılabilir. Ayrıca biyokütlenin biyogaza dönüştürülmesi evsel kullanımlarda olduğu gibi, kojenerasyon tekniğiyle elektrik üretimin de ve günümüzde ülkemizin tam anlamıyla dışa bağımlı bulunduğu motorlu taşıt yakıtlarının alımında biyogazın bu taşıtlarda kullanılmaya başlanmasıyla dışa bağımlılıkta büyük düşüşler yaşanabilir. Bunun yanı sıra biyogaz üretimi sonucunda sıvı formda fermente organik gübre elde edilmektedir. Fermantasyon sonucu elde edilen organik gübrenin temel avantajı anaerobik fermantasyon sonucunda patojen mikroorganizmaların

büyük bir bölümünün yok olması ve fermentasyon sonucu elde edilen organik gübrenin daha verimli olmasıdır.

Türkiye, yenilenemeyen enerji kaynakları bakımından dışa bağımlıdır. Bu, kalkınmaya ayrılması gereken kaynakların önemli bir bölümünün enerji dış alımına aktarılmasına neden olmaktadır, Ülkemiz, küçümsenmeyecek bir organik gübre, bitkisel ve kentsel atık potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin yeterince değerlendirilebildiği söylenemez, uzun yıllardır üretilen hayvan gübrelerinin büyük bir bölümü tezek olarak yakılmaktadır. Sonuçta topraklarımız için vazgeçilmez olan organik madde de yok olmaktadır, enerji tasarrufu sağlamak ve enerji üretimine katkıda bulunmak amacıyla biyogaz üretim ve kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Biyogaz tesislerinin yaygınlaştırılmasıyla organik materyaller değerlendirilip enerji üretilebileceği gibi, elde edilen biyogübre topraklarda kullanılabilecek, ayrıca kırsal kesimde çevre sağlığına olumlu katkıda bulunabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kaya, O.**, 1999. Yemek artıklarından biyogaz enerjisi üreten sistemin tasarımı ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [2] **Gülen, J. ve Arslan, H.** 2005. Biyogaz, *Sigma*, **4**, s.121-129.
- [3] **Acaroğlu, M.**, 2003. Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- [4] **Tafdrup, S.**, 1994. Centralized biogas plants combine agricultural and environmental benefits with energy production, *Water Science and Technology*, **30**, s.133-140.
- [5] **Duran, M., Güven, E. Uğurlu, Ö. ve Tezel, U.**, 2001. Organik atıklardan anaerobik yöntemlerle biyogaz eldesi, Türkiye’de uygulanabilirlik, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, İzmir, s. 99-103.
- [6] **Öncel, S., İkizoğlu, E. Öngen, Gaye. ve Vardar, Sukan.**, 2001. E. Ü. Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İzmir.
- [7] **Anozie, A.N., Layokun, S.K. and Okeke, C.U.**, 2005. An evaluation of a batch pilot- scale digester for gas production from agricultural wastes, *Energy Sources*, **27**, s. 1301-1311.
- [8] **Taner, F. ve Ardiç, İ.**, 2003. “Asidik Önışlemlerin Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretim Verimine Etkileri” *V. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi* Ankara, s. 432-442.
- [9] **Sadaka, S. and Engler, C. R.**, 2000. Anaerobic composting of swine, poultry and beef manure with biogas recovery, *ASAE Annual International Meeting, Technical Papers*, Engineering Solutions for a New Century, **2**, pp. 5035-5049.
- [10] **Kalyuzhnyi, S.**, 1998. Fedorovich, V., Nozhevnikova, A., “Anaerobik treatment of liquid fraction of hen manure in UASB reactors”, *Bioresource Technology*, **65**, pp. 221-225.
- [11] **Bujoczek, G., Oleszkiwicz, J. Sparling, R. and Cenkowski, S.**, 2000. High solid anaerobic digestion of chicken manure, *J.Agricultural Engineering Resources*, **76**, 51-60.
- [12] **Oerther, D.B.**, 2006. Anaerobic Treatment in the 21st Century. *Water Environment Research*, **78**, 459.

- [13] **Callaghan, F.J., Wase, D.A.J. Thayanithy, K. and Forster, C.F.,** 2002. Continuous codigestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure, *Biomass and Bioenergy*, **27**, pp. 71–77.
- [14] **Mahanta, P., Saha, U.K. Dewan, A. and Kalita, P.,** 2004. The influence of temperature and total solid concentration on the gas production rate of a biogas digester, *Journal of Energy in Southern Africa*, **15**, pp. 112-117.
- [15] **Sadaka, S. and Engler, C.R.,** 2000. Effects of mixing on anaerobic composting of beef manure, *American Society of Agricultural Engineers*, **2**, pp.4993-5001.
- [16] **Angelidaki, I., Boe, K. and Ellegaard, L.,** 2005. Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants, *Water Science and Technology*, **52**, pp. 189-194.
- [17] **Demirbaş, A.,** 2009. Green Energy and Technology, Biohydrogen Future For Engine Fuel Demands, London, Springer.
- [18] **Çukurçayır, M.A., ve Sağır, H.,** 2010. “Enerji Sorunu, Çevre ve Alternatif Enerji Kaynakları”, Web erişim, www.sosyalbil.selcuk.edu.tr/sos_mak/articles/2008/20/ACUKURCAYIRH_SAGIR.PDF. 19.07.2010.
- [19] **Çanka Kılıç, F.,** 2011. Biyogaz, önemi, genel durumu ve Türkiye'deki yeri, *Mühendis ve Makina* **52**, s.94-106.
- [20] http://www.soylenasil.com/bilim/kati_atikpr.htm, 15 Şubat 2011.
- [21] **Nacar, Koçer, N., ve Ünlü, A.,** 2007. “Doğu Anadolu Bölgesinin Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi,” *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ.
- [22] **McKendry, P.,** 2002. “Energy Production From Biomass (Part 2): Conversion Technologies”, *Biosource Technology*, **83**, 47-54.
- [23] **Özgür, M.A.,** 2008. “Review of Turkey’s Renewable Energy Potential”, *Renewable Energy*, **33**, 2345-2356.
- [24] **T.C Tabii ve Enerji Kaynaklar Bakanlığı,** <http://www.enerji.gov.tr/index.php>,
- [25] **Ayas, C., Demirayak, F. Karaosmanoğlu, F. İş, G. Kumbaroğlu, G. Or, İ. Can, O.Yenigün, O. ve Arıkan, Y.,** 2009. İklim Çözümleri: 2050 Türkiye Vizyonu, X-Press Baskı, İstanbul.
- [26] **Kaygusuz, K., ve Sarı, A.,** 2003. “Renewable Energy Potential and Utilization in Turkey”, *Energy Conversion and Management*, **44**, 459-478.
- [27] **Yu, H.W., Samani, Z. Hanson, A., and Smith, G.,** 2002. Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion, *Waste Management*, **22**, p.1-5.

- [28] **Taleghani, G., and Kia, A.S.,** 2005. Technical-economical analysis of the Saveh biogas power plant, *Renewable Energy*, **30**, 441-446.
- [29] **Bouallagui, H., Lahdheb H. Romdan, E.B. Rachdi, B. and Hamdi, M.,** 2009. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition, *Journal of Environmental management*, **90**, p. 1844-1849.
- [30] **Langhans, G.,** 2002. Manure and Biowaste Digestion in Germany -History, Trends and Pratical Verification, Linde-KCA-Dresden GmbH, www.linde126kca.com/WGAP/kca/file/fachberichte/Biowaste-Digestion.pdf;jsessionid=0000JxfBSwFIsQibgWnnxE WBS3:-1
- [31] **Klingler, B.,** 2000. Environmental Aspects of Biogas Technology,<http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d7env.pdf>.
- [32] **Dupla, M., Conte, T. Bouvier, J.C. Bernet, N. and Steyer, J.P.,** 2004. Dynamic Evaluation of A Fixed Bed Anaerobic Digestion Process in Response to Organic Overloads and Toxicant Shock Loads, *Water Sci Technol.*, **49(1)**, pp. 61-68.
- [33] **Öztürk, İ.,** 1999. “Anaerobik Biyoteknoloji ve Atık Arıtımındaki Uygulamaları”, Birsen Yayınevi, Eyüp, 1-25, 35-38.
- [34] **Chakravarthi, J.,** 1997. “Biogas and energy production from cattle waste”, *Energy Conversion Engineering Conference*, Proceedings of the 32nd Intersociety, 648-651, USA.
- [35] **Kalt Schmitt, M., and Hartmann, H.,** 2001. Energie aus Biomasse –B Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag Berlin, *Heidelberg*, New York.
- [36] **Braun, R.,** 1982. Biogas, Methangärung organischer Abfallstoffe; Springer Verlag Wien, New York.
- [37] **Kloss, R.,** 1986. Planung von Biogasanlagen; *Oldenbourg Verlag München*, Wien.
- [38] **Schattner, S., Gronauer, A.,** 2000. Methangärung verschiedener Substrate – Kenntnisstand und offene Fragen, Gülzower Fachgespräche, Band 15: Energetische Nutzung von Biogas: *Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, S. 28–38, Weimar.
- [39] **SchmittenertecGmbH**,[http://www.schmitt-enertec.de/deutsch/bhkw/bhkw technik.htm](http://www.schmitt-enertec.de/deutsch/bhkw/bhkw%20technik.htm) Zugriff 31.07.09.
- [40] **Werner, U., Stohr, U. and Hees, N.,** 1989. Biogas Plants in Animal Husbandry, *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH*, p. 1-55.

- [40] **Deublein, D., and Steinhauser, A.,** 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources, p.1-450.
- [41] **Sabuncu, C.Ö.,** 2010. Biyogaz üretiminin teknik, ekonomik ve çevresel analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [42] **Wandrey, C., and Aivasidis, A.,** 1983. Zur Reaktionskinetik der anaeroben Fermentation; *Chemie Ingenieur-Technik* **55**, Nr. 7, S. 516–524, Weinheim.
- [43] **Bauer, C., Korthals, M. Gronauer, A. and Lebuhn, M.,** 2008. Methanogens in biogas production from renewable resources – a novel molecular population analysis approach. *Water Sci. Tech.* **58**, No. 7, S. 1433–1439
- [44] **Kroiss, H.,** 1985. Anaerobe Abwasserreinigung. Wiener Mitteilungen Bd. 62; *Technische Universität Wien*.
- [45] **Demirel, B., Neumann L. and Scherer, P.,** 2008. Microbial community dynamics of a continuous mesophilic anaerobic biogas digester fed with sugar beet silage. *Eng. Life Sci.* 8, No. **4**, S. 390–398.
- [46] **Oechsner, H., and Lemmer, A.,** 2009. Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?, *VDI-Berichte* **2057**, S. 37–46
- [47] **Deublein, D., and Steinhauser, A.,** 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources, p.1-450.
- [48] **Bouallagui, H., Touhami, Y. Cheikh, R.B. and Hamdi, M.,** 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes, *Process biochemistry* **40**, p.989-995.
- [49] **Themelis, N.J., and Ulloa P.A.,** 2007. Methane generation in landfills, *Renewable Energy* **32**, 1243-1257.
- [50] **Gerardi, M.H.,** 2003, The Microbiology of Anaerobic Digesters, Wastewater Microbiology Series, *Wiley-Interscience*, p. 1-188.
- [51] **Arnott, M.,** 1985. The Biogas/Biofertilizer Business Handbook, Peace Corps, *Information Collection and Exchange*, Reprint R-48.
- [52] **Weiland, P., and Rieger, Ch.,** 2001. Wissenschaftliches Messprogramm zur Bewertung von Biogasanlagen im Landwirtschaftlichen Bereich; (FNR-FKZ: 00NR179); 3. Zwischenbericht; Institut für Technologie und Systemtechnik/ Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL); Braunschweig.
- [53] **Bouallagui, H., Torrijos, M. Godon, J.J. Moletta, R. Cheikh, R.B. Touhami, Y. Delgenes, J.P. and Hamdi, M.,** 2004. Two-phases anaerobic digestion of

fruit and vegetable wastes: bioreactors performance, *biochemical engineering journal* **21**, p. 193-197.

- [54] **Comino, E., Rosso, M. and Riggio, V.**, 2009. Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix, *Bioresource Technology* **100**, p. 5072-5078.
- [55] **P., De Baere, L. and Verstraete, W.**, 2003. Types of anaerobic digesters for solid wastes, 2003, IWA publishing, biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes, p. 111-137.
- [56] **Martínez-Pérez, N., Cherryman, S.J. Premier, G.C. Dinsdale, R.M. Hawkes, D.L. Hawkes, F.R. Kyazze, G. and Guwy, A.J.**, 2007. The Potential for Hydrogen-Enriched Biogas Production from Crops, *Biomass and Bioenergy*, in Press Scenarios in The UK.
- [57] **Krich, K., Augenstein, D. Batmale, J.P. Benemann, J. Rutledge, B. and Salour, D.**, 2005. Biomethane from Dairy Waste: *A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California*, [http://www.calstart.org/info/publications/Biomethane from Dairy Waste Full Report.pdf](http://www.calstart.org/info/publications/Biomethane_from_Dairy_Waste_Full_Report.pdf)
- [58] **Vandevivere, P., De Baere, L. and Verstraete, W.**, 2003. Types of anaerobic digesters for solid wastes, IWA publishing, *biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes*, p. 111-137.
- [59] **Demuynck, M., Nyns, J. and Palz, W.**, 1984. Biogas Plants in Europe, Energy from Biomass Series, 6. D. Reidel Publishing Company, Boston, USA.
- [60] **Aoki, K., Umetsu, K. Nishizaki, K. Takahashi, J. Kishimoto, T. Tani, M. Hamamoto, O. and Misaki, T.**, 2006. Thermophilic biogas plant for dairy manure treatment as combined power and heat system in cold regions, *International Congress Series* **1293**, 238-241.
- [61] **Anon.**, 1999b. Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- [62] **Gale, S.**, 2001. Modern Residuals Processing in Theory and Practice, http://www.hatch.ca/Sustainable_Development/Articles/organics_processing_2001.pdf
- [63] **Kashyap, D.R., Dadhich, K.S. and Sharma, S.K.**, 2003. Biomethanation Under Psychrophilic Conditions: A Review, *Bioresource Technology*, **87**, pp. 147–153.
- [64] **Rajeshwari, K.V., Balakrishnan, M. Kansal, A. Lata, K. and Kishore, V.V.N.**, 2000. State-of-Art of Anaerobic Digestion Technology for Industrial Wastewater Treatment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **4**, pp.135-156.

- [65] **Weiland, P.**, 2001. Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, Nr. 1620. *Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven*, S. 19-32; VDI-Verlag.
- [66] **Pekin, B.**, 1983. Biyokimya Mühendisliği (Biyoteknoloji), *Ege Üniversitesi Kimya Fakültesi Yayınları*, No:3, İzmir, ss. 368-385
- [67] **Koç, Y., Koç, A. Bulgan, A.T. and Akçakoyun, N.**, 1990. Biyogaz Üretimi ve Tesislerin Projelendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 2, ss. 3-19, Ankara.
- [68] **Gustavsson, M.**, 2000. Biogas Technology-Solution in Search of Its Problem – A Study of Small-Scale Rural Technology Introduction and Integration", Göteborg University, Göteborg.
- [69] **Öztürk, M.**, 2005. Hayvan gübresinden biyogaz üretimi, *Çevre ve Orman Bakanlığı*, p. 9-21.
- [70] **Boyd, R.**, 2000. Internalising Environmental Benefits of Anaerobic Digestion of Pig Slurry in Norfolk, University of East Anglia, <http://www.greentrust.org/%20PigSlurryADProject.pdf>
- [71] **Igoni, A.H., Ayotamuno, M.J. Eze, C.L. Ogaji, S.O.T. and Probert, S.D.**, 2008. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste, *Applied Energy* **85**, 430-438.
- [72] **Vijayalekshmy, M.V.**, 1985. Biogas Technology-an Information Package, Tata Energy Research Institute, Bombay.
- [73] **Fry, L. John**, 1973. Methane Digesters for Fuel Gas and Fertilizer-With Complete Instructions For Two Working Models, The New Alchemy Institute, Massachusetts.
- [74] **Axaopoulos, P., Panagakis, P. Tsavdaris, A. and Georgakakis, D.**, 2001. Simulation and Experimental Performance of a Solar-Heated Anaerobic Digester, *Solar Energy*, Vol. 70, 2, pp. 155-164.
- [75] **Jenangi, L.**, 1981. Producing Methane Gas From Effluent, Adelaide University Diploma in Agricultural Production, <http://www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/project.pdf>
- [76] **Marchaim, U.**, 1992. Biogas Processes for Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN92-5-103126-6.
- [77] **Sambo, A.S., Garba, B. and Danshehu, B.G.**, 1995. Effect of Some Operating Parameters on Biogas Production Rate, *Renewable Energy*, Vol. 6, 3, pp. 343-344.

- [78] **El-Mashad, H.M., Van Loon, W.K.P. and Zeeman, G.,** 2003. A Model of Solar Energy Utilisation in the Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Biosystems Engineering*, **84** (2), pp. 231–238.
- [79] **Singh, R., Malik, R.K. and Tauro, P.,** 1985. Anaerobic Digestion of Cattle Waste at Various Retention Times: A Pilot Plant Study, *Agricultural Wastes*, **12**, pp. 313-316.
- [80] **Dennis, A., and Burke, P.E.,** 2001. Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook, Options for Recovering Beneficial Products From Dairy Manure, Environmental Energy Company, www.makingenergy.com
- [81] **Kishore, V.V.N., Raman, P. and Rao, V.V.R.,** 1987. Fixed Dome Biogas Plants- A Desing, Construction and Operation Manual, Tata Energy Research Institute, New Delhi.
- [82] **Murphy, J.D., and McKeogh, E.,** 2004. Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste, *Renewable Energy* **29**, 1043-1057.
- [83] **Chynoweth, D.P., and Pullammanappallil, P.,** 1996. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Wastes, in Palmisano, A.C. and Barlaz, M.A. eds. *Microbiology of Solid Waste*, CrC Press, Inc., Boca Raton, Florida, pp. 71-113.
- [84] **Chavez-Vazquez, M., Bagley, D.M.,** 2002. Evaluation of The Performance of Different Anaerobic Digestion Technologies for Solid Waste Treatment, *CSCE/EWRI of ASCE Environmental Engineering Conf.*, Niagara.
- [85] **Monnet, F.,** 2003. An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes, <http://www.remade.org.uk/documents/reports/An%20Introduction%20to%20Anaerobic%20Digestion%2027153953177.pdf>
- [86] **Al-Azzam, S.M.,** 2003. Biogas a Source of Energy, <http://www.jes.org.jo/projects/BioGas/pdfs/s/english.pdf>
- [87] **Palmer, D.G.,** 1981. Biogas: Energy from Animal Waste, U.S. Government Printing Office 781-145, SERI
- [88] **Sarapatka, B.,** 1993. A Study of Biogas Production During Anaerobic Fermentation of Farmyard Manure, *Biomass and Bioenergy*, Vol.5, 5, pp. 387-393.
- [89] **Samsunlu, A.,** 1999. “Çevre Mühendisliği Kimyası” İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Sam-Çevre Teknolojileri Merkezi yayınları, İstanbul.
- [90] **Çağlar, A., ve Uçar, T.,** 1981. Türkiye'de Biyogaz Potansiyeli ve Üretim Kinetiği, *Uluslararası Biyogaz Semineri*, Ankara, ss. 290-303.

- [91] **Klein, J.**, 2002. Anaerobic Wastewater Treatment – the Anaerobic Digestion of Lipids, Tampere University of Technology, *Department of Environmental Engineering*, <http://studweb.studserv.uni-stuttgart.de>
- [92] **Jain, M.K., Singh, R. and Tauro, P.**, 1981. Anaerobic Digestion of Cattle and Sheep Wastes, *Agricultural Wastes*, **3**, pp. 65-73.
- [93] **Badawi, M.A., Blanc, F.C. Wise, D.L. E1-Shinnawi, M.M. Abo-Elnaga, S.A. and EI-Shimi, S.A.**, 1992. Anaerobic Treatment with Methane Recovery of Agricultural and Village Wastes, *Resources, Conservation and Recycling*, **7**, pp. 305-323.
- [94] **Verma, S.**, 2002. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes, Columbia University, <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>
- [95] **Brummeler, E.T., Hulshoff, W.L. Dolfing, J. Lettinga, G. Zehender, J.B.**, 1985. “Methanogenesis in an Upflow Anaerobik Sludge Blanket Reactor at pH 6 on an Acetate-Propionate Mixture” *Applied and Environmental Microbiyology*, Vol:**49**, No:6.
- [96] **Devkoda, G.,P.**, 2003. November, “Biogas Installation and Training” Organized by METTA Development Foundation,BSEP,GLT. Kathmandu. NEPAL.
- [97] “Information and Advisory Service on Appropriate Technology, 2002. Biogas Digest” , 2002, *Biogas Basic*, Volume I.
- [98] **Mutlu, S. F.**, 2003. “Biyogazın kırsal kesimde kullanımı ve tasarım temelleri”, *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, **27**, 39-41
- [99] **Karim, K., Klasson, T. Hoffmann, R., and Al-Dahhan, M.H.**, 2005. “Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing”, *Bioresource Technology*, **96**, 1607–1612.
- [100] **Onat, S., and Topaloğlu, B.**, 2004. “Bir Biyogaz Üretim Sistem Modeli”, V. *Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 601-608, İstanbul.
- [101] **Casey, T.J.**, 1986. “Requirements and methods for mixing in anaerobic digesters”, *Elsevier App. Sci. Pub.*, 90-103.
- [102] **Lee, S.R., Cho, N.K. and Maeng, W.J.**, 1995. “Using the pressure of biogas created during anaerobic digestion as the source of mixing power”, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, **80 (4)**, 415-417.
- [103] **Smith, L.C., Elliot, D.J. and James, A.**, 1996. “Mixing in upflow anaerobic filters and its influence on performance and scale-up”, *Water Research*, **30 (12)**, 3061-3073.

- [104] **Burton, C.H., Turner, C.,** 2003. Manure Management Treatment Strategies for Sustainable Agriculture, Silsoe Research Institute, ISBN: 0 9531282 61.
- [105] **Tushar, J., and Ghos, D.N.,** 1990. Studies on Residence Time Distribution in Cylindrical and Rectangular Biogas Digesters, *Energy*, Vol. **15, 11**, pp. 987-991.
- [106] **Anon.,** 1999c. Biogas Digest Volume II- Biogas - Application and Product Development, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- [107] **Sasse, L.,** 1988. Biogas Plants, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- [108] **Schlicht, A.C.,** 1999. Digester Mixing Systems Can You Properly Mix with too Little Power?, Walker Process Equipment, www.walkerprocess.com/papers/DIGMIX.pdf
- [109] **Anon.,** 1999b. Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- [110] **Keshtkar, A., Meyssami, B. Abolhamd, G. Ghaforian, H. and Asadi M.K.,** 2003. Mathematical Modeling of Non-Ideal Mixing Continuous Flow Reactors for Anaerobic Digestion of Cattle Manure, *Bioresource Technology*, **87**, pp. 113–124.
- [111] **Karim, K., Hoffmann, R. Klasson, T. and Al-Dahhan, M.H.,** 2005b. Anaerobic Digestion of Animal Waste: Waste Strength Versus Impact of Mixing, *Bioresource Technology*, **96**, pp. 1771–1781.
- [112] **Karim, K., Hoffmann, R. Klasson, K.T. and Al-Dahhan, M.H.,** 2005a. Anaerobic Digestion of Animal Waste: Effect of Mode of Mixing, *Water Research*, **39**, pp. 3597–3606.
- [113] **Pullammanappallil, P., Svoronos, S.A. Chynoweth, D.P. and Lyberatos, G.,** 1998. Expert System for The Control of Anaerobic Digesters, *Biotechnology and Bioengineering*, **58(1)**, pp. 13-22.
- [114] **Pullammanappallil, P.C., Chynoweth, D.P. Lyberatos, G. and Svoronos, S.A.,** 2001. Stable Performance of Anaerobic Digestion in the Presence of a High Concentration of Propionic Acid, *Bioresource Technology*, **78(2)**, pp. 165-169.
- [115] **Stafford, D.A., Hawkes, D.L. and Horton, R.,** 1981. Methane Production from Waste Organic Matter, CRC Press, Inc., ISBN 0-8493-5223-1, Boca Raton, Florida.

- [116] **Stuckey, D.C.**, 1981. Gelişmekte Olan Ülkelerde Isı ve Katkı Maddelerinin Anaerobik Sindirime Etkisi, Uluslararası Biyogaz Semineri, 23-26 Kasım ss. 16-40, Ankara.
- [117] **Eldem, N.Ö., Ozturk, I. Soyer, E. Callı, B. and Akgiray, Ö.**, 2004. Ammonia and pH Inhibition in Anaerobic Treatment of Wastewaters, *Part I: Experimental, Journal of Environmental Science and Health, Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, Vol. **A39, 9**, pp. 2405–2420.
- [118] **Sterling Jr., M.C., Lacey, R.E. Engler, C.R. and Ricke, S.C.**, 2001. Effects of Ammonia Nitrogen on H₂ and CH₄ Production During Anaerobic Digestion of Dairy Cattle Manure, *Bioresource Technology*, **77**, pp. 9-18
- [119] **Steffen, R., Szolar, O. and Braun, R.**, 1998. Feedstocks for Anaerobic Digestion, ADNETT
- [120] **Intrachandra, N., Tongta, S. and Meeyoo, V.**, 2002. Biogas Production from Co-Digestion of Animal Wastes, The Proceeding of the 9th APCChE Congress and CHEMECA, Christchurch, New Zealand.
- [121] **Maekawa, T.**, 1999. Biomass Gas Fuels, CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume 5, Energy and Biomass Engineering, Published by the American Society of Agricultural Engineers, ISBN 0-929355-97-0, pp. 201-222.
- [122] **Anon.**, 2000c. AT Information: Biogas, http://www5.gtz.de/gate/%20techinfo/biogas/AT_biogas.html
- [123] **Chynoweth, D.P., Wilkie, A.C. and Owens, J.M.**, 1999. Anaerobic Treatment of Piggery Slurry, *Asian-Aus. J. Anim Sci.*, **12(4)**, pp.607-628.
- [124] **Hansen, K.H., Angelidaki, I. and Ahring, B.K.**, 1999. Improving Thermophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure, *Wat. Res.*, Vol. **33, 8**, pp. 1805-1810.
- [125] **Masse, D.I., Lu, D. Masse, L. and Droste, R.L.**, 2000. Effect of Antibiotics on Psychrophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure Slurry in Sequencing Batch Reactors, *Bioresource Technology*, **75**, pp. 205-211
- [126] **Weiland, P.**, 2000. Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland, Gülzower Fachgespräche, Band **15**, *Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*, S. 8–27, Weimar.
- [127] **Kutlu, H.R., Gül, A. ve Görgülü, M.**, Türkiye Hayvancılığı; Hedef 2023., Sorunlar, Çözüm Yolları ve Politika Arayışları. <http://ziraat.cu.edu.tr/aykutgul/belgeler/hayvancilikrapor.pdf>
- [128] **Koçak, Ç.**, 1991. Etlik piliç üretimi, Bilgehan Basımevi, Bornova-İzmir.

- [129] **Akkaya, C.**, 2002. Isparta İli Yumurta Tavukçuluğu ve Etlik Piliç Yetiştiriciliğinde Kullanılan Kümes ve Alet-Ekipman Tiplerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Zootečni Ana Bilim Dalı , Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [130] <http://www.tuik.gov.tr>
- [131] www.tae.gov.tr
- [132] **North, M. O., and Donallt, B. D.**, 1990. Avavi book published by van nastiand reinhold, pp. 189 - 191.Newyork.
- [133] **Bengston, L.P., and Whitaker, J. H.**, 1986. Structure in tropical climates, *Food and Agricultural Organization of The United Nations*, pp. 40 – 42 Rome.
- [134] **Yavuzcan, G.**, 1983. İçsel tarım mekanizasyonu, A.Ü. Ziraat Fakültesi Yayınları: **871**, ss. 13-15.Ankara.
- [135] **Gül, N.**, Tavuk gübresinden biyogaz üretim potansiyelinin araştırılması, 2006. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [136] **Alyanak, İ., and Filibeli, A.**, 1987. Tavuk Çiftliği Artıklarının Çevre Etkilerinin Önlenmesi ve Yararlı Hale Getirilmesi Alternatifleri, Uluslararası Çevre Sempozyumu, Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü, Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Atık ve Kirlenme Denetimi Araştırma Grubu. ss. 79-93, İstanbul.
- [137] **Salminen, E., and Rintala, J.**, 2002. Anaerobic digestion of organic solid Poultry slaughterhouse waste – a review. *Bioresource Technology*, **83**, 13–26.
- [138] **Ergün A., Çoldan İ.**, 2004. “Yemler yem hijyeni ve teknolojisi”, Üniversitesi Yayınları, ss. 204-207, Ankara.
- [139] **Türoğlu M., Arda M. Yetişir R. Sarıca M. Atlan A. ve Erensayın C.**, 2004. “Tavukçuluktaki gelişmeler ve Türkiye tavukçuluğu”, Ankara Üniversitesi Yayınları, ss. 138–151, Ankara.
- [140] İnternet: University of Minnesota 2007. " A Review of Poultry Manure Management: Directions for the Future" <http://www.ansci.umn.edu/poultry/resources/manure.htm>.
- [141] **Karataş, A.**, 2006, “Tavuk gübresinin anaerobik parçalanması için uygun koşulların belirlenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [142] **Ravena, R.P.J.M., and Gregersen, K.H.**, 2007. Biogas plants in Denmark: Successes and Setbacks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 116–132.

- [143] **Junginger, M., de Vissera, E. Hjort-Gregersenb, K. Koornneefa, J. Ravenc, R. Faaija, A. and Turkenburg, W.,** 2006. Technological Learning in Bioenergy Systems, *Energy Policy*, **34**, pp. 4024–4041.
- [144] **Börjesson, P., and Berglund, M.,** 2006. Environmental Systems Analysis of Biogas Systems—Part I: Fuel-Cycle Emissions, *Biomass and Bioenergy*, **30**, pp. 469–485.
- [145] **Lantza, M., Svensson, M. Björnsson, L. and Börjesson, P.,** 2007. The Prospects for An Expansion of Biogas Systems in Sweden-Incentives, *Barriers and Potentials*, *Energy Policy*, **35**, pp. 1830–1843.
- [146] **Taşdemiroğlu, E.,** 1991. Economics of Biogas Space Heating Systems in Rural Turkey, *Bioresource Technology*, **36**, pp. 147-155.
- [147] **Demirbaş, A.,** 2004b. The Importance of Biomass, *Energy Sources*, **26**, pp. 361–366
- [148] **Acaroglu, M., Kocar, G. and Hepbasli, A.,** 2005. The Potential of Biogas Energy, *Energy Sources*, **27**, pp. 251–259.
- [149] **Buğutekin, A., ve Binark, A.K.,** 2004. “Dünyada ve Ülkemizde Biyogaz Çalışmaları” IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri kitabı, Sh 593-600, İstanbul.
- [150] 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: 2007. *Building a more sustainable future*, **848** final, p.1-20, Brussel.
- [151] **Öner, B.,** 2009. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Avrupa Birliği Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, Avrupa Birliği enerji politikasındaki gelişmeler: arz güvenliğinin sağlanması, ICCI 15.Uluslararası enerji ve çevre fuarı ve konferansı bildiriler kitabı, s. 37-43.
- [152] EurObser’ER, Biogas Barometer, 2008. p.45-59.
- [153] **Önenç, Ö.,** 2009. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Şube Müdürlüğü, Yenilenebilir enerji kaynaklarında yapılan çalışmalar ve mevzuat, Yapı Fuarı, TMMOB Mimarlar Odası İstanbul Büyükşehir Şubesi Ekolojik Yapı Tasarımı, Malzeme, Teknoloji ve Çevre Paneli, p. 1-48.
- [154] **Akbulut, A., Dikici, A.,** 2004. Elazığ ilinin biyogaz potansiyeli ve maliyet analizi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, s. 36-41. Elazığ.
- [155] www.eie.gov.tr

- [156] **Gültekin, H.**, 2009. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2000-2009 yılları arasında işletmeye açılan üretim santrallerinin, verimlilik, teknoloji ve sektörlerine yönelik değerlendirme ve piyasa eğilimleri, ICCI 15.Uluslararası enerji ve çevre fuarı ve konferansı.
- [157] **Kaygusuz, K., and Keleş, S.**, 2009. Use of Biomass as a transitional strategy to a sustainable and clean energy system, *Energy sources, Part A: recovery, utilization and environmental effects* **31**, 86-97.
- [158] **TUİK**, Seragazi emisyon envanteri, 2007. *Haber Bülteni*, **111**, p.1-2.
- [159] **Bahtiyar Ö., ve Emin O.**, 2008. Membran yöntemiyle biyogazdan karbondioksitin ayrıştırılması ve metan saflaştırma, *Proje No: 105Y084*, Samsun.
- [160] <http://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/leitfaden-biogas.html>
Biyogaz Kılavuzu Üretimden Kullanıma. 2010.
- [161] **Lie, J.A.**, 2005. Synthesis, performance and regeneration of carbon membranes for biogas upgrading, PhD Thesis, *Norwegian University of Science and Technology* (NTNU),
- [162] **Anon.**, 1997a. Energy From Biomass -Volume 4- *Anaerobic Digestion for Biogas*, <http://www.dti.gov.uk/files/file14938.pdf>
- [163] **Strevett, K.A., Vieth, R.F. and Grass, D.**, 1995. Chemo-Autotrophic Biogas Purification for Methane Enrichment: Mechanism and Kinetics, *The Chemical Engineering Journal*, **58**, pp. 71-79.
- [164] **Anon.**, 2000e. Biogas Technology and Biogas Use in Sweden, NOMIK AB, Traffic & Public Transport Authority, Göteborg.
- [165] **Jensen, J.K., and Jensen, A.B.**, 2000. Biogas And Natural Gas Fuel Mixture For The Future, *1st World Conference And Exhibition on Biomass For Energy And Industry*, Sevilla
- [166] **Huang, J., and Crookes, R.J.**, 1998. Assessment of Simulated Biogas as a Fuel for the Spark Ignition Engine, *Fuel*, Vol. **77**, 15, pp. 1793-1801
- [167] **Persson, M., Jönsson, A. and Wellinger, A.**, 2007. Biogas upgrading to vehicle fuel standarts and grid injection. *International Energy Agency (IEA) Publications, Bioenergy*. Task **37**: Energy throughout the whole world, Berlin, May 7-11.
- [168] **Dahl, A.**, 2003. Quality control of biogas as vehicle fuel. *Swedish Gas Center Report No, 138*, Malmö.
- [169] **Hagen, M., Polman, E. Myken, A. Jensen, J. Jönsson, O. and Dahl, A.**, 2001. Adding Gas from Biomass to the Gas Grid, Contract No: XVII/4.1030/Z/99-412, Final Report, <http://uk.dgc.dk/pdf/altener.pdf>

- [170] **Muche, H., and Zimmermann, H.,** 1985. The Purification Of Biogas, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit(GTZ) GmbH, Eschborn.
- [171] **Park, D., Lee, D.S., Joung, J.Y. and Park, J.M.,** 2005. Comparison of Different Bioreactor Systems for Indirect H₂S Removal Using Iron-Oxidizing Bacteria, *Process Biochemistry*, **40**, pp. 1461–1467.
- [172] **Anon.,** 1980a. Energy From Biological Processes, <http://www.wws.princeton.edu/ota/disk3/1980/8008/8008.PDF>
- [173] **Truong, L.V.-A., and Abatzoglou, N.,** 2005. A H₂S Reactive Adsorption Process for The Purification of Biogas Prior to Its Use as A Bioenergy Vector, *Biomass and Bioenergy*, **29**, pp. 142–151.
- [174] **Mitzlaff, K.Von,** 1988. Engines for Biogas, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- [175] **Spiegel, R.J., and Preston, J.L.,** 2000. Test Results for Fuel Cell Operation on Anaerobic Digester Gas, *Journal of Power Sources*, **86**, pp. 283-288.
- [176] **Solarenergieförderverein Bayern e. V.,** 2008. Biogasaufbereitungssysteme zur Einspeisung in das Erdgasnetz – Ein Praxisvergleich, München.
- [177] **Richter, G., Grabbert, G. and Shurrab, M.,** 1999. Biogaserzeugung im Kleinen, *Gwf-Gas Erdgas*, Nr. **8**, S.528-535.
- [178] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), 2006. Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Leipzig.
- [179] **Buğutekin, A.,** 2007. Atıklardan biyogaz üretiminin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [180] **Mahmood A.,** 2004. “ CO₂ Capture and Bioconversion to Biogas in an Anaerobic System using UASB Reactor” Department of Building, Civil Environmental Engineering, Degree of Master of Applied Science at Concordia University, Canada.
- [181] **Urban, W., Girod, K. and Lohmann, H.,** 2007–2008. Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung.
- [182] **Jäkel, K.,** 1998 – 2002. Managementunterlage „Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung“, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.

- [183] **Polster, A., Brummack, J. Mollekopf, N.,** 2006. Abschlussbericht, Verbesserung von Entschwefelungsverfahren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, TU Dresden.
- [184] Swedish Gas Center, 2001. Report SGC 118 – Adding gas from biomass to the gas grid. Malmö, verfügbar unter: <http://www.sgc.se/dokument/sgc118.pdf>
- [185] **Brauckmann, J.,** 2002. Planung der Gasaufbereitung eines mobilen Brennstoffzellenstandes. Diplomarbeit, Fraunhofer UMSICHT und FH Münster.
- [186] **Edelmann, W.,** 2002. Products, Impacts and Economy of Anaerobic Digestion of OFMSW, IWA Publishing, Biomethanization of The Organic Fraction of Municipal Solid Wastes, Edited by J. Mata-Alvarez, ISBN: 1 900222 14 0
- [187] **Kapdi, S.S., Vijay, V.K. Rajesh, S.K. and Prasad, R.,** 2005. Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, **30**, 1195-1202.
- [188] **Kayhanian, M., and Hills, D.J.,** 1988. Membrane purification of anaerobic digester gas. *Biol.Wastes* **23(1)**, 1-15.
- [189] **Röhr, M. and Wimmerstedt, R.,** 1990. A comparison of two commercial membranes used for biogas upgrading. *Desalination* **77**, 331-345.
- [190] **Li, K. and Teo, W.K.,** 1993. Use of an internally staged permeator in the enrichment of methane from biogas. *J. Membr. Sci.* **78(1-2)**, 181-190.
- [191] **Rautenbach, R. and Welsch, K.,** 1994. Treatment of landfill gas by gas permeation-plot plant results and comparison to alternatives. *J.Membr. Sci.*, **87**, 107-118.
- [192] **Stern, S.A., Krishnakumar, B. Charati, S.G. Amato, W.S. and Friedman, A. D.J.,** 1998. Performance of a bench-scale membrane pilot plant for the upgrading of biogas in a wastewater treatment plant. *J.Membr. Sci.* **151(1)**, 63-74.
- [193] **Harasimowicz, M., Orluk, P. Zakrzewska-Trznadel, G. and Chmielewski, A.G.,** 2007. Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. *J.Hazardous Materials* **144**, 698-702.
- [194] **Ramesohl, S., Hofmann, F. Urban, W. and Burmeister, F.,** 2006. Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Studie im Auftrag von BGW und DVGW.
- [195] **Weiland, P.,** 2003. Notwendigkeit der Biogasaufbereitung, Ansprüche einzelner Nutzungsrouten und Stand der Technik. Vortrag im Rahmen des FNR-Workshops „Aufbereitung von Biogas“ vom in Braunschweig.

- [196] **Schönbucher, A.**, 2002. Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse. Springer-Verlag, Heidelberg.
- [197] “Minnesota’s Potential for Electricity Production Using Manure Biogas Resources”, 2003, April. Minnesota Department of Commerce State Energy Office,
- [198] **Holm-Nielsen J.B., Seadi, T.A. and Oleskowicz-Popiel, P.**, 2009. The Future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology* **100**, 5478-5484.
- [199] **Eyidoğan, M.**, 2008. Biyogazın saflaştırılması ve motorlu taşıt yakıtı olarak kullanımı, 2008, *Mühendis ve Makina Cilt*, **49** Sayı:584, s. 18-24.
- [200] **Murphy, J.D., Power, N.**, 2009. Technical and economic analysis of biogas production in Ireland utilising three different crop rotations, 2009, *Applied Energy* **86**, p. 25-36.
- [201] **Osorio, F., Torres, J.C.**, 2009. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production, *Renewable Energy*, p. 1-8.
- [202] **Tricase, C., Lombardi, M.**, 2009. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations, *Renewable Energy* **34**, 477-485.
- [203] **Kocar, G., Eryasar, A. and Illeez, B.**, 2007. Biogas Feasibility in Energy requirement of a Rural House in Izmir/ Turkey, The 3rd International Energy, Exergy and Environment Symposium, 1-5 July Evora, Portugal.
- [204] **Walsh, J.L., Ross, C.C. Smith, M.S. and Harper, S.R.**, 1989. Utilization of Biogas, *Biomass*, **20**, pp. 277-290.
- [205] **Jash, T., and Basu, S.**, 1999. Development of a Mini-Biogas Digester for Lighting in India, *Energy*, **24**, pp. 409-411.
- [206] **Jiang, Z., Steinsberger, S.C. and Shih, J.C.H.**, 1987. In Situ Utilization of Biogas on a Poultry Farm: Heating, Drying and Animal Brooding, *Biomass*, **14**, pp. 269-281.
- [207] **Mears, D.T.**, 2001. Biogas Applications for Large Dairy Operations: Alternatives to Conventional Engine-Generators, Cornell Cooperative Extension Association of Wyoming County.
- [208] **Winfield, R.G.**, 1986. Biogas Production Facilities on Farms - A 1985 Look at the Recent Experience, RR#1, Belmont, Ontario, N0L1B0.

- [209] **Hudson, G., Patel, N. and Haskard, P.,** 2001, The Development of An Efficient Combustion System that Fires Bio-Fuels, for Use in Rural Areas of The Philippines, http://www.mecheng.adelaide.edu.au/courses/undergrad/projects/level4papers2001/hudson_patel_haskard.pdf
- [210] **Porpatham, E., Ramesh, A. and Nagalingam, B.,** 2007. Effect of Hydrogen Addition on The Performance of A Biogas Fuelled Spark Ignition Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, in Press.
- [211] **Leggett, J.A., Graves, R.E. and Lanyon, L.E.,** 2002. Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction from Manure, <http://www.age.psu.edu/extension/factsheets/g/G77.pdf>
- [212] **Seadi, T.A., Rutz, D. Prassl, H. Köttner, M. Finsterwalder, T. Volk, S. and Janssen, R.,** 2008. Biogas Handbook, *Biogas for Eastern Europe*, p.1-126.
- [213] **Mueller, S.,** 2007. 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, *Renewable Energy*, **32**, 248-256.
- [214] **İGDAŞ,** 2007. Kojenerasyon ve trijenerasyon sistemleri, s. 1-4.
- [215] **Dong, L., Liu, H. and Riffat, S.,** 2009. Development of small-scale and micro-scale biomassfuelled CHP systems-a literature review, *Applied Thermal Engineering*, **29**, 2119-2126.
- [216] **Ertesvag, I.S.,** 2007. Exergetic comparison of efficiency indicators for combined heat and power (CHP), *Energy*, **32**, 2038-2050.
- [217] **Heinze, U., Rockmann, G., and Sichtung, J.,** 2000. Energetische Verwertung von Biogasen, Bauen für die Landwirtschaft, Heft Nr. 3.
- [218] **Raggam, A.,** 1997. Ökologie-Energie; Skriptum zur Vorlesung; Institut für Wärmetechnik; Technische Universität Graz.
- [219] **Thomas, B.,** 2007. Stirlingmotoren zur direkten Verwertung von Biobrennstoffen in dezentralen KWK-Anlagen, Vortrag Staatskolloquium BWPLUS, Forschungszentrum Karlsruhe.
- [220] **Kaltschmitt, M.,** 2009. Hartmann, H.: Energie aus Biomasse Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag.
- [221] **Dielmann K. P.,** 2001. Mikrogasturbinen Technik und Anwendung, BWK Das Energie- Fachmagazin, 06/2001, Springer VDI Verlag.
- [222] **Dielmann, K. P.,** 2002. Krautkremer, B.: Biogasnutzung mit Mikrogasturbinen in Laboruntersuchungen und Feldtests, Stand der Technik und Entwicklungschancen, Elfte Symposium Energie aus Biomasse Biogas,

Pflanzenöl, Festbrennstoffe, Ostbayrisches Technologie- Transfer-Institut e. V. (OTTI) Regensburg, Tagungsband.

- [223] **Willenbrink, B.**, 2002. Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Erneuerbare Energien in der Land (wirt) schaft, *Verlag für land (wirt) schaftliche Publikationen*, Band 5, 1. Auflage Dezember, Zeven.
- [224] Mikro-KWK Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., Verlag Rationeller Erdgaseinsatz.
- [225] **Scholz, V., Schmersahl, R., and Ellner, J.**, 2008. Effiziente Aufbereitung von Biogas zur Verstromung in PEM-Brennstoffzellen.
- [226] Wie funktioniert eine Absorptionskältemaschine, <http://www.bhkw-info.de/kwkk/funktion.html> Zugriff 05.08.2009.
- [227] **Schneider, M.**, 2006. Abwärmenutzung bei KWK – innovative Konzepte in der Verbindung mit Gasmotoren, Kooperationsforum Kraft-Wärme-Kopplung – Innovative Konzepte für neue Anwendungen, Nürnberg.
- [228] ORC-Anlage nutzt Abwärme aus Biogasanlagen, [http://www.energynet.de/2008/04/23/orc-anlage-nutzt-abwar-me-aus-biogasanlagen/zuletzt besucht: 05.08.2009](http://www.energynet.de/2008/04/23/orc-anlage-nutzt-abwar-me-aus-biogasanlagen/zuletzt%20besucht%3A05.08.2009)
- [229] Bio-Erdgas an Karlsruher Erdgas-Tankstellen, <http://www.stadtwerke-karlsruhe.de/swka/aktuelles/2009/07/20090711.php>, zuletzt besucht: 06.08.2009
- [230] **Felt, A., and Steele, W.**, 1962. "Combustion Control in Dual-Fuel Engines", *SAE Trans*, **70**,644.
- [231] **Karim, G.**, 1983. "The Dual-Fuel engine of the compression ignition type-prospects. roblems and solutions- A Revrew" *SAE Trains*, paper 831073.
- [232] **Ali Yücel U., Kemal E.**, “içten yanmalı motorlarda biyogaz kullanımı ve motor performansına etkisi” Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [233] **Henham, A., and Makkar, M.K.**, 1998. Combustion of Simulated Biogas in a Dual-Fuel Diesel Engine, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. **39**, No. 16-18, pp. 2001-2009.
- [234] **Jewell, W.J., Koelsch, R.K. and Cummings, R.J.**, 1986. Cogeneration of Electricity and Heat from Biogas, SERI/STR-231-2844, Golden, Colorado.
- [235] **Purohit, P., and Kandpal, T.C.**, 2007. Techno-Economics of Biogas-Based Water Pumping in India: An Attempt to Internalize CO₂ Emissions Mitigation and Other Economic Benefits, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 1208–1226

- [236] **Bayhan, M., and Zablocki, M.,**1991. Biogas as Fuel in Agricultural Engines, 13.Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi, Konya
- [237] “Biogas and Natural Resources Management” (BNRM) Newsletter Issue No:1 to 51,1978-1996.
- [238] **Gunnerson, C. G., and D. V. Stuckey.,** 1986. “Integrated Resource Recovery- Anaerobic Digestion-Principles and Practices for Biogas systems”. World Bank Technical Paper No. 49.
- [239] “Energy and environmental technology A system approach to biogas technology” (FAO/CMS), 1996.
- [240] **Cheng-qiu, J., Tian-wei, L. and Jian-li, Z.,** 1989. A Study on Compressed Biogas and Its Application to the Compression Ignition Dual-Fuel Engine, *Biomass*, **20**, pp. 53-59.
- [241] **Anon.,** 2000h. Environmental Benefits of Anaerobic Digestion, EPA (Environmental Protection Agency), <http://www.epa.gov/region09/waste/solid/compost.pdf>
- [242] **Pellerin, R.A., Walker, L.P. Heisler, M.G. and Farmer, G.S.,** 1988. Operation and Performance of Biogas-Fueled Cogeneration Systems, *Energy in Agriculture*, **6**, pp. 295-310.
- [243] **Roubaud, A., and Favrat, D.,** 2005. Improving Performances of A Lean Burn Cogeneration Biogas Engine Equipped with Combustion Prechambers, *Fuel*, **84**, pp. 2001–2007.
- [244] **Amon, T., Boxberger, J. Lindworsky, J. And Scheibler, M.,** 2003. Biogas Production in Agriculture-Safety Guidelines, Confermentation and Emissions from Combined Heat and Power Couplings, <http://www.ramiran.net/doc98/FINORAL/AMONTHO.pdf>
- [245] **Crookes, R.J.,** 2006. Comparative Bio-Fuel Performance in Internal Combustion Engines, *Biomass and Bioenergy*, **30**, pp. 461–468.
- [246] **Anon.,** 1999a. “Biogas Upgrading and Utilisation” IEA Bioenergy, http://www.recyclenow.org/Report_IEA_Bioenergy_1MB.pdf
- [247] **Piccinini, S., Fabbri, C., Riva, G.,** 1996. Biogas Use in Pig Breeding: Sizing and Installation of Cogenerators in Italy, <http://homepage2.nifty.com/biogas/cnt/refdoc/whrefdoc/d2cogene.pdf>
- [248] **Johansson, B.,** 1999. The Economy of Alternative Fuels When Including the Cost of Air Pollution, Transportation Research, Part D **4**, pp. 91-108 (BG-101).

- [249] **Anon.**, 2000i. Reducing Barriers to Zero and Low Emission Mobility is the Final Report of the ZEUS Project, <http://www.miljobilar.stockholm.se/upload/3430/Zeus-FinalReport.pdf>
- [250] **Ergeneman, M., Mutlu, M. Kutlar, O. A. ve Arslan, H.**, 1998. Taşıtlardan Kaynaklanan Egzoz Kirleticileri, Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 1-14.
- [251] **Behçet R., ve Çakmak A.V.**, 2011. Bir Dizel Motorda Yakıt Olarak Kullanılan Balık Yağı Metil Esteri Karışımlarının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- [252] **Soruşbay, C., ve Gökten, A. G.**, 1993. “Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Çevre Kirliliği ve Kontrolü”, İTÜ 1. Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Sempozyumu, s. 157-166, İstanbul.
- [253] **Barlas, A.**, 1996. “Egzoz Gazlarının Çevreye Etkileri”, Egzoz Gazlarının Çevreye Etkileri Semineri, s. 8-24, İstanbul.
- [254] **Soruşbay, C.**, 1993. “Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolünde Kullanılan Yöntemler”, 2. Motor ve Taşıt Tekniği Sempozyumu, İzmir.
- [255] **Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen A.**, 1992. Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, s. 32-37, Ankara.
- [256] **Bilgin, A. ve Durgun, O.**, 1997. “Taşıt Motorlarında Kirletici Emisyonların Oluşum Mekanizmaları ve Önlenmesi”, 5. Yanma Sempozyumu, s. 196-208, Bursa.
- [257] **Yıldırım, A. M., ve Sürmen, A.**, 1997. “Buji Ateşlemeli Motorlarda HC Emisyonlarının Oluşumu ve Alev Geçişi Sonrası Davranımının Matematik Modeli”, 5. Yanma Sempozyumu, s. 176-188, Bursa.
- [258] **Kılıç, T., Bozkurt, T. Mamalı, C. Ünal, G. Gümüş, A. Şentürk, H. Solak Z., ve Karataş, Ö.**, Motorlu Taşıtlar ve Adapazarı’nda Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Emisyonların Envanterlenmesi.

ÖZGEÇMİŞ

01/12/1983 tarihinde Mardin’de doğan Halis DEVİREN ilk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2005 yılında Dicle Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliğini kazandı ve 2009 yılında bu bölümden başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve yüksek lisans öğrenimi devam etmektedir.

Halis DEVİREN
ELAZIĞ – 2012