

**HAYVANSAL ATIKLARIN KOFERMENTASYONU  
İLE BİYOGAZ ÜRETİMİ**

**2016  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Mustafa KARAGÖZ**

**HAYVANSAL ATIKLARIN KOFERMENTASYONU İLE BİYOGAZ  
ÜRETİMİ**

**Mustafa KARAGÖZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Eylül 2016**

Mustafa KARAGÖZ tarafından hazırlanan “HAYVANSAL ATIKLARIN KOFERMENTASYONU İLE BİYOGAZ ÜRETİMİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Emrah DENİZ



Tez Danışmanı, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir. 09/09/2016

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

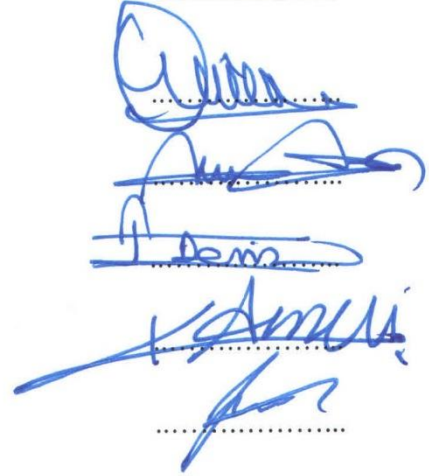
Başkan : Prof. Dr. Durmuş KAYA (KOÜ)

Üye : Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Emrah DENİZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Suat SARIDEMİR (DÜZCE Ü.)



...../...../2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü





*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mustafa KARAGÖZ

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **HAYVANSAL ATIKLARIN KOFERMENTASYONU İLE BİYOGAZ ÜRETİMİ**

**Mustafa KARAGÖZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Emrah DENİZ**

**Eylül 2016, 112 sayfa**

Buji ateşlemeli motorlarda yakıt tüketim ve egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla doğalgaz, biyogaz ve alkoller alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Çalışmanın birinci aşamasında, pilot ölçekli bir biyogaz sistemi kurularak, %40'ı büyük baş hayvan gübresi, %35'i su, %17'si peynir altı suyu ve %8'i tavuk gübresinden oluşan hammadde karışımından kofermantasyon yöntemi ile biyogaz üretilmiştir. Biyogaz üretimini gerçekleştirmek için yaklaşık 6 m<sup>3</sup> lük bir biyogaz tesisi kurulmuştur. Kurulan biyogaz tesisinde basınç, devir, sıcaklık, konum ve durum bilgileri alınarak motor, vana, karıştırıcı ve blower gibi sistem elemanlarına müdahale edilerek sistemin operatörün istediği doğrultuda optimum çalışma koşulları ile kontrolünü sağlayan bir SCADA yazılımı oluşturulmuş ve otomasyon sistemi kurulmuştur. Kurulan otomasyon sistemi ve SCADA yazılımıyla, sensör ve cihazlardan gelen bilgiler doğrultusunda ortam sıcaklığı, fermentör sıcaklığı, üretilen biyogaz, toplam üretilen biyogaz, fermentör basınç değişimi grafikleri gerçek zamanlı olarak

kaydetme imkânı sağlanmıştır. Üretilen biyogazın bünyesindeki kirletici gazların ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) giderilmesi amacıyla yıkama ve desulfürizasyon işlemleri iki aşamada uygulanmıştır. Saflaştırma işlemi sonunda %51, %57 ve %87 (M51, M57 ve M87)  $\text{CH}_4$  içeriğine sahip biyogaz elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, elde edilen biyogaz yakıtlarının buji ateşlemeli bir motorda kullanılmasının performansı, emisyon, gürültü emisyonu ve yanma karakteristiklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyleerde; 4 silindirli, 4 zamanlı, 11:1 sıkıştırma oranına sahip su soğutmalı buji ateşlemeli bir motor kullanılmıştır. Testler değişik yük (1,5- 3- 4,5- 6- 7,5- 9 kW) ve sabit hızda (1500 rpm) gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, biyogaz içeriğindeki metan oranının artmasıyla birlikte 9 kW yükleme değeri için silindir içi basınç ve egzoz gazı sıcaklığı sırasıyla %23,11 ve %6,5 oranında artmış, özgül yakıt tüketimi ise, %13,5 azalmıştır. Ayrıca, metan oranındaki artışa bağlı olarak  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  emisyonları artarken HC emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Biyogaz, biyogaz üretimi,  $\text{CH}_4$  konsantrasyonu, gürültü, performans, emisyon.

**Bilim Kodu** : 914.1.233

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **BIOGAS PRODUCTION WITH COFERMENTATION OF ANIMAL WASTES**

**Mustafa KARAGÖZ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Doç. Dr.Emrah DENİZ**

**September2016, 112 pages**

Natural gas, biogas and alcohols are alternative fuels for spark ignition engines which can be used for decreasing exhaust emissions and improving fuel economy. At the first stage of the study, a pilot scale biogas system was built and biogas was produced from a mixture of manure and water called slurry, consisting of 40% cattle manure, 35% water, 17% whey and 8% poultry manure by cofermentation method. A biogas plant with about 6 m<sup>3</sup> capacity is constructed for the biogas production. An automation with SCADA software is developed as to enable the operator to adjust the system to the optimum operation conditions by modifying the system components like the engine, valve, mixer and blower according to the status data such as the pressure, rotational speed, temperature, sensor status and condition etc. Ambient temperature, fermenter temperature, mass flow rate of produced biogas, total produced biogas and fermenter pressure variation graphs are recorded by SCADA software in real time using the data coming from the sensor and devices.

Scrubbing and desulfurization were applied to remove the harmful gasses ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) from the produced biogas in two stages. In the end of purification process biogas with  $\text{CH}_4$  content of 51%, 57% and 87% (M51, M57 and M87) are produced. In the second stage, these biogas fuels are used in a spark ignition engine and their effects on performance, emissions, noise emissions and combustion characteristics are investigated experimentally. A 4 cylinder, 4 stroke water cooled spark ignition engine with 11:1 compression ratio is used in the experiments. Tests were conducted at various loads (1,5-3-4,5-6- 7,5- 9 kW) and constant speed (1500 rpm).

Results showed that as the methane ratio in biogas increase, cylinder pressure (23,11%) and exhaust temperature (6,5%) values increase, and specific fuel consumption decreases (13,5%) at 9 kW engine load. Besides, as the methane ratio increases,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  emissions increase while HC emission decreases.

**Key Word** : Biogas, biogas production,  $\text{CH}_4$  concentration, noise, performance, emission.

**Science Code** : 914.1.233



## TEŞEKKÜR

Bu tezin ortaya çıkmasındaki muntazam katkı ve yönlendirmelerinden dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Emrah DENİZ'e; tez çalışmam süresince farklı zamanlarda gerçekleştirdiğimiz tez izleme komitesine katılım sağlayan ve çalışmalarımı olumlu tavsiyeleriyle yönlendiren değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Durmuş KAYA'ya ve Sayın Doç. Dr. Kamil ARSLAN'a; "Karabük Üniversitesi Biyogaz Üretim ve Araştırma Merkezi" nin kurulumunda her türlü katkı ve desteğini esirgemeyen değerli rektörümüz Sayın Prof. Dr. Refik POLAT ve rektör yardımcımız Sayın Prof. Dr. Mustafa YAŞAR'a; tez çalışmam süresince her türlü bilgi ve tecrübeleri ile destek veren Sayın Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN ile Doç. Dr. Suat SARIDEMİR'e ve Orman Fakültesi Dekanı ve Otomotiv Müh. Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK'e; günlük, akademik ve profesyonel iş hayatımda bana destek veren, cesaretlendiren ve tezim boyunca sürekli yanımda olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Muharrem EYİDOĞAN, Sayın Öğr. Gör. Burak ÇİFTÇİ, Sayın Arş. Gör. Mustafa AYDIN'a, çalışma hayatımda önemli yer tutan mesai arkadaşlarım ve dostlarım, Yrd. Doç. Dr. M. Akif ERDEN, Öğr. Gör. Murat KOŞAR, Öğr. Gör. Yusuf KURTGÖZ'e ve Nuri TUNÇ'a sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, bugünlere gelmemde maddi ve manevi paha biçilmez emekleri olan annem Huriye KARAGÖZ, babam Dursun KARAGÖZ ve kardeşlerim ile çalışmalarım boyunca bir an olsun desteğini esirgemeyen hayat arkadaşım biricik eşim Sıdika KARAGÖZ ve dünya tatlısı kızım Merve Sena KARAGÖZ'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 .....	4
LİTERATÜR ÖZETİ .....	4
BÖLÜM 3 .....	9
İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ALTERNATİF YAKITLAR.....	9
3.1. HİDROJEN .....	9
3.2. ALKOL ESASLI YAKITLAR .....	11
3.3. LPG .....	12
3.4. CNG.....	13
3.5. BİYODİZEL.....	14
3.6. BİYOGAZ.....	16
BÖLÜM 4 .....	17
BİYOGAZ.....	17
4.1. BİYOGAZIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ.....	17
4.2. DÜNYA VE TÜRKİYE’DE BİYOGAZIN YERİ .....	19

4.3. BİYOKÜTLEDEN ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER	21
4.3.1. Hidroliz	22
4.3.2. Fermantasyon	23
4.3.3. Asitleşme	23
4.3.4. Metanlaşma	23
4.4. ANAEROBİK FERMANTASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	23
4.4.1. Reaktör Sıcaklığı	24
4.4.2. Hidrolik Bekleme Süresi	25
4.4.3. Organik Yükleme Oranı	27
4.4.4. Karıştırma	28
4.4.5. Reaktör İçi Basınç	28
4.4.6. Köpük Oluşumu Ve Etkisi	29
4.4.7. Asitlik Ve Bazlık Derecesi (pH Değeri)	29
4.4.8. Karbon Azot Oranı (C/N)	30
<b>BÖLÜM 5</b>	<b>32</b>
<b>MATERYAL VE METOT</b>	<b>32</b>
5.1. BİYOGAZ ÜRETİMİ	32
5.1.1. Kullanılan Maddeler Ve Hazırlanması	32
5.1.2. Hammadde Hazırlanmasında Kullanılan Cihazlar	33
5.2. DENEY SİSTEMİ VE SİSTEM EKİPMANLARI	35
5.2.1. Biyogaz Üretimi Ve Saflaştırılmasında Kullanılan Sistemler	35
5.2.1.1. Fermenterler Ve Hammadde Transfer Sistemi	36
5.2.1.2. Karıştırma Sistemi	39
5.2.1.3. Gaz Toplama Ve Fermentör İçi Basınç Kontrol Sistemi	40
5.2.1.4. Isıtma Sistemi Ve Sıcaklık Takip Sistemi	41
5.2.1.5. Saflaştırma Sistemi	42
5.2.1.6. Fermantasyon Ve Kullanım Suyunun Yağmur Suyundan Temini	43
5.2.1.7. SCADA Ve Otomasyon Sistemi	44
5.2.1.8. Pnömatik Vanaların Kontrolü	45
5.2.2. Biyogaz Üretimi Ve Saflaştırılmasında Kullanılan Cihazlar	46
5.2.2.1. Yük Hücresi (Load Cell)	46
5.2.2.2. Sistemde Kullanılan Elektrik Motorları	47

5.2.2.3. Seviye Kontrol Cihazları.....	47
5.2.2.4. Basınç Algılayıcı.....	48
5.2.2.5. Isıl çiftler.....	48
5.2.2.6. Loblu Pompa.....	49
5.2.2.7. Redüktörler.....	49
5.2.2.8. Blower Fan.....	50
5.2.2.9. Sürücüler.....	50
5.2.2.10. Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (PLC).....	51
5.2.2.11. Gaz Akış Ölçer.....	51
5.2.2.12. Biyogaz Analizörü.....	52
5.2.2.13. Vanalar.....	52
5.2.3. Biyogaz Tüketiminde Kullanılan Cihazlar.....	53
5.2.3.1. Data Logger.....	54
5.2.3.2. Egzoz Emisyon Analizörü.....	55
5.2.3.3. Hava Kütle Ölçer.....	55
5.2.3.4. Silindir İçi Basınç Sensörü Ve Encoder.....	55
5.2.3.5. Biyogaz Sayacı.....	56
5.2.3.6. Gürültü Emisyon Ölçümleri.....	57
5.3. DENEY VERİLERİ İLE HESAPLANAN PERFORMANS DEĞERLERİ .	57
5.3.1. Motor Moment Değerinin Tespiti.....	57
5.3.2. Özgül Yakıt Tüketimi.....	59
5.3.3. Hava-Yakıt Oranı.....	59
5.3.4. Volumetrik Verim.....	60
5.3.5. Fren Termik Verimi.....	60
5.3.6. Sıcaklık Ölçümü.....	61
5.3.7. Silindir Basıncının Mutlak Basınca Dönüştürülmesi.....	61
5.3.8. Isı Dağılımı Analizi Ve Filtreleme.....	61
5.3.9. Biyogazın Bağıl Yoğunluğunun Tespiti.....	63
BÖLÜM 6.....	64
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	64
BÖLÜM 7.....	77

DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR .....	80
EK AÇIKLAMALAR A.YALITIM SONRASI FERMENTÖRLERİN TERMAL KAMERA GÖRÜNTÜLERİ.....	89
EK AÇIKLAMALAR B.TÜRKİYE'DEKİ İŞLETMEDE VE PLANLAMADA OLAN BİYOGAZ TESİS SAYILARI .....	91
EK AÇIKLAMALAR C.YÜK HÜCRE Sİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	93
EK AÇIKLAMALAR Ç.SEVİYE TESPİT CİHAZI TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	95
EK AÇIKLAMALAR D.FARK BASINÇ TRANSMİTTERİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	97
EK AÇIKLAMALAR E.MİCROMASTER 440 MOTOR SÜRÜCÜSÜ TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	99
EK AÇIKLAMALAR F.GAZ AKIŞ ÖLÇERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ .....	101
EK AÇIKLAMALAR G.BİYOGAZ ANALİZÖRÜNÜN KALİBRASYON SERTİFİKASI.....	103
EK AÇIKLAMALAR Ğ.BUJİ ATEŞLEMELİ MOTOR-JENERATÖR SETİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ .....	106
EK AÇIKLAMALAR H.DATA KARTININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ.....	108
EK AÇIKLAMALAR I.KULLANILAN HAVA KÜTLE ÖLÇERİN HAVA DEBİSİ - ÇIKIŞ VOLTAJİ GRAFİĞİ .....	110
ÖZGEÇMİŞ .....	112

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 4.1. Biyokütle ve organik atıklardan enerji dönüşüm yöntemleri.....	21
Şekil 4.2. Anaerobik fermantasyon aşamaları.....	22
Şekil 4.3. Metan bakterilerinin sıcaklığa bağlı olarak büyüme oranları. ....	25
Şekil 4.4. Farklı organik madde yükleme oranı ile HBS arasındaki ilişki. ....	26
Şekil 5.1. Hassas terazi.....	34
Şekil 5.2. Çalışmalarda kullanılan kül ve etüv fırınları. ....	35
Şekil 5.3. Deney sisteminin görünümü. ....	35
Şekil 5.4. Sistem elemanlarının yerleşimi.....	37
Şekil 5.5. Hammadde transfer sisteminin şematik görüntüsü. ....	38
Şekil 5.6. Fermentör içi hammadde karıştırma sistemi.....	40
Şekil 5.7. Gaz toplama sistemi. ....	41
Şekil 5.8. Isıtma ve sıcaklık takip sistemi. ....	42
Şekil 5.9. CO <sub>2</sub> giderimi için yıkama kulesinin şematik görüntüsü. ....	43
Şekil 5.10. Yağmur suyu toplama sistemi.....	44
Şekil 5.11. SCADA yazılımının kullanıcı ara yüzü. ....	45
Şekil 5.12. Pnömatik vana kontrol sistemi.....	46
Şekil 5.13. Yük Hücresi (Load cell).....	47
Şekil 5.14. Elektronik fark basınç transmitteri. ....	48
Şekil 5.15. Fark basınç transmitteri.....	48
Şekil 5.16. Kafalı K tipi ısıl çift. ....	49
Şekil 5.17. Loblu pompa. ....	49
Şekil 5.18. Sistemde kullanılan redüktörler. ....	50
Şekil 5.19. Blower fan.....	50
Şekil 5.20. Siemens Micromaster 440 motor sürücüsü.....	51
Şekil 5.21. Gaz akış ölçer.....	52
Şekil 5.22. Biyogaz analizörü. ....	52
Şekil 5.23. Vanaların sistemdeki yerleri. ....	53
Şekil 5.24. Deney sisteminin şematik görüntüsü. ....	54

Şekil 5.25. Hava kütle ölçer. ....	55
Şekil 5.26. Encoder ve silindir içi basınç sensörü.....	56
Şekil 5.27. Gaz sayacı. ....	56
Şekil 5.28. Rezistans grubu.....	58
Şekil 6.1. %CH <sub>4</sub> oranı ve Biyogaz üretim miktarının zamana göre değişimi.....	64
Şekil 6.2. Fren özgül yakıt tüketiminin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	66
Şekil 6.3. Volümetrik verimin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. .	67
Şekil 6.4. Efektif verim değerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	68
Şekil 6.5. Egzoz sıcaklık değerlerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	69
Şekil 6.6. Silindir içi gaz basınçlarının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	70
Şekil 6.7. Isı yayma oranlarının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	71
Şekil 6.8. CO emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.....	72
Şekil 6.9. HC emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.....	74
Şekil 6.10. NO <sub>x</sub> emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. .	75
Şekil 6.11. Ölçülen ortalama gürültü seviyesi değerlerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. ....	76

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. İçten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar. ....	9
Çizelge 3.2. Hidrojenin yakıt özellikleri. ....	10
Çizelge 3.3. Metanol ve etanol yakıtının özellikleri. ....	11
Çizelge 3.4. Bütan ve propanın özellikleri. ....	13
Çizelge 3.5. CNG'yi oluşturan gazların hacimsel yüzdeleri. ....	14
Çizelge 3.6. Biyodizel için Avrupa standartlarına göre bazı özellikleri. ....	15
Çizelge 4.1. Biyogaz bileşenleri. ....	17
Çizelge 4.2. 1 m <sup>3</sup> biyogaza eşdeğer yakıt miktarları. ....	18
Çizelge 4.3. Çeşitli ülkelerde kurulu biyogaz tesis adetleri. ....	19
Çizelge 4.4. AB ülkelerinde kurulu biyogaz tesisi sayısı ve üretim miktarları. ....	20
Çizelge 4.5. Sektörlere göre biyogaz tesislerinin dağılımı ve toplam kurulum kapasiteleri. ....	20
Çizelge 4.6. Organik materyallerin mezafolik şartlar altında HBS değeri. ....	27
Çizelge 4.7. Biyometan üretimi için pH değerleri. ....	30
Çizelge 4.8. Sık kullanılan bazı materyallerin C/N oranları. ....	31
Çizelge 5.1. Deneyleerde kullanılan cihazların teknik özellikleri verilmiştir. ....	36
Çizelge 5.2. Egzoz emisyon analizörü özellikleri. ....	55
Çizelge 5.3. Gürültü ölçüm cihazına ait teknik özellikler. ....	57
Çizelge 6.1. Yakıt özellikleri. ....	65
Çizelge 6.2. Hava-yakıt oranının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi. .....	73



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$b_e$	: Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
$CH_4$	: Metan
$CH_3OH$	: Metanol
$C_2H_6$	: Etan
$C_2H_5OH$	: Etanol
$C_3H_8$	: Propan
$C_4H_{10}$	: Bütan
$CO$	: Karbonmonoksit
$CO_2$	: Karbondioksit
$E_\theta$	: Herhangi bir krank açısında elde edilen çıkış sinyali
$HC$	: Hidrokarbon
$H_u$	: Kullanılan yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg)
$H_2S$	: Hidrojen Sülfür
$H_2$	: Hidrojen
$k$	: Özgül ısı katsayısı
$M51$	: %51 Metan içeriğine sahip biyogaz
$M57$	: %57 Metan içeriğine sahip biyogaz
$M87$	: %87 Metan içeriğine sahip biyogaz
$\dot{m}$	: Birim zamanda eklenen organik madde miktarı (kg/gün)
$\dot{m}_h$	: Kütleli hava debisi (g/s)
$\dot{m}_y$	: Yakıt tüketimi (g/h)
$N_2$	: Nitrojen
$NO_x$	: Nitrojenoksit
$O_2$	: Oksijen
$P$	: Silindir iç basıncı (kPa)
$P_b$	: Efektif güç (kW)

$P_{\theta}$	: Herhangi bir krank açısında elde edilen basınç (bar)
$\frac{dP}{d\theta}$	: Krank açısına göre silindir basıncının türevi
$\dot{Q}_n$	: Krank açısına göre ısı dağılım oranı (kJ/°)
$S$	: Kükürt
$V$	: Silindir hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_f$	: Fermentör hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_h$	: Tüketilen gerçek hava hacmi (m <sup>3</sup> )
$V_s$	: Pistonun silindirde boşalttığı hacim (m <sup>3</sup> )
$\dot{V}$	: Fermentöre günlük yüklenen organik madde hacmi (m <sup>3</sup> /gün)



## KISALTMALAR

- AID : Alt Isıl Değer  
BS : Bekleme Süresi (Gün)  
CI : Compression Ignition (Sıkıştırma İle Ateşlemeli Motor)  
CNG : Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğalgaz)  
EKÜ : Elektronik Kontrol Ünitesi  
FÖYT : Fren Özgöl Yakıt Tüketimi ( $m^3/kWh$ )  
HBS : Hidrolik Bekleme Süresi (Gün)  
HYO : Hava Yakıt Oranı  
LPG : Liquid Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)  
OYO : Organik Yükleme Oranı  
PLC : Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi)  
RB : Reaktör Üzeri Boşluk (m)  
SI : Buji Ateşlemeli Motor

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Enerji ve enerji kaynaklarını elde etmek için Dünya devletleri ve uluslararası kuruluşlar birbiri ile kıyasıya bir rekabet içerisindedirler [1]. Sanayileşmenin bel kemiği ve günlük hayatta vazgeçilmez bir yere sahip olan enerjiye talep gün geçtikçe artmaktadır. Küresel olarak enerji; ticari ve endüstriyel aktivitelerde, evde kullanılan cihazlarda anahtar faktördür. Refah düzeyinin artması, gelişen teknolojiyle birlikte yaşam alanlarından evde prize takılı cihaz sayısına kadar birçok yaşam standardında artış yaşanmaktadır. Bu durum, üreticiden tüketiciye her alanda enerji talebinde artışına sebep olmaktadır. Türkiye’de sadece son 25 yılda kişi başına düşen elektrik tüketimi yaklaşık 4 kat artmıştır[2]. Enerji tüketimindeki artış nedeniyle, enerji ihtiyacı ülkemizde uluslararası gündemde oldukça önemli bir yer tutar [3]. Enerji kaynakları yenilenemez ve yenilenebilir olmak üzere genellikle iki başlık altında toplanır. Yenilenemez enerji kaynakları kısa zaman aralığında üretilmeyen enerji kaynağı olarak tanımlanır. Bunlar, fosil kökenli yakıtlardır. Yenilenebilir enerji kaynakları ise, tekrar tekrar kullanılabilen enerji kaynaklarıdır ki güneş, hidro enerji, rüzgâr ve biyokütle yenilenebilir enerjiye birer örnektir.

Dünya enerji tüketiminin %86’sı, 2003 yılı verilerine göre fosil kökenli kaynaklardan sağlanmıştır. Enerji tüketim miktarındaki artış oranının aynı kalması halinde kömür rezervlerinin 230, doğalgazın 60, petrolün ise 40 yıllık ömrünün kaldığı tahmin edilmektedir [4]. Günümüzde fosil kökenli yakıtların tükenmeye başlaması ve önemli çevresel sorunlara sebep olması, alternatif enerji kaynaklarına olan talebin artmasını sağlamıştır. Artan talep ise, alternatif enerji kaynaklarının iyileştirilmesi, ucuz, temiz, ve yeterli miktarda enerji üretmek ve sorunsuz kullanımı konusundaki çalışmaları hızlandırmıştır. Alternatif enerji kaynakları konusundaki çalışmalar başta güneş, rüzgâr ve biyogaz alanlarında yoğunlaşmış ve bu kaynakların

geliştirilebilmesi amacıyla yeni sistem ve uygulama yöntemleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir.

Alternatif enerji kaynaklarından biri olan biyolojik olarak üretilen gaz ya da biyogaz; biyolojik atıklardan, tarımsal atıklarından ve hayvansal atıklar vb. atıklardan farklı metotlarla üretilen bir gazdır. Biyogaz içeriğinde %50-70 CH<sub>4</sub>, %30-50 CO<sub>2</sub>, %<1 N<sub>2</sub>, 10-4000 ppm H<sub>2</sub>S, %<0.2 O<sub>2</sub> bulundurmaktadır ve alt ısıl değeri 24-33 MJ/Nm<sup>3</sup> aralığındadır [5]. Biyogaz içeriğindeki CH<sub>4</sub> miktarına bağlı olarak ısıtma ve elektrik üretimi gibi uygulamalarda verimli bir biçimde kullanılabilen, ortaya çıkan atık ise, yüksek kaliteli doğal gübre olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, hayvan gübrelere hammadde olarak kullanımıyla hayvan gübresinden kaynaklanan insan sağlığını ve yeraltı sularını tehdit eden hastalık etmenlerinin büyük oranda etkinliğinin azalmasını sağlamaktadır[6].

Biyogazın bünyesinde bulunan CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>S gibi gazların konsantrasyonları, kullanılan yöntem ve biyolojik maddelerin özelliklerine bağlı olarak değişmekte olup, bünyesindeki bu gazların konsantrasyonlarına bağlı olarak çeşitli enerji yoğunluğu ve tutuşma değerlerine sahip olabilmektedir.

Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı ile artan enerji talebini karşılanmasında oldukça önemli sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, biyogazın yanması sırasında salınan karbon, karbon döngüsü içerisinde olduğu için, atmosferdeki toplam karbon sayısını değiştirmez[7]. Bir dizel motorun enjektörleri, buji ile değiştirilerek modifiye edildiğinde, yüksek sıkıştırma oranına sahip buji ateşlemeli bir biyogaz motoruna dönüştürülebilir[8]. Dizel motorları genellikle ağır vasıtalarda ve endüstride elektrik üretiminde kullanılır[9].

Biyogaz jeneratörleri hem çevreci olması hem de alternatif yakıtla çalışması sebebiyle endüstride elektrik üretiminde kullanılan dizel jeneratörlerin yerini alabilir. Ülkemizde “Yenilenebilir Enerji Kanunu” kapsamında biyogaz jeneratörlerinden üretilen elektriğin teşvikli fiyatı 0,133 USD/kWh olması biyogazdan elektrik üretimini daha cazip hale getirmektedir[6].

Literatürde elektrik üretiminde köklü bir geçmişe sahip dizel ve bujiyle ateşlemeli motorlarda titreşim, performans ve egzoz emisyonlarının incelendiği yüzlerce çalışma olmasına karşın kofermantasyon yöntemi ile üretilen biyogazın kullanıldığı dizel jeneratörün yerini alabilecek bir dört silindirli biyogaz-jeneratör ünitesinde performans, egzoz ve gürültü emisyonu, yanma karakteristiklerinin (silindir içi gaz basıncı ve ısı dağılımı) incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatürdeki boşluğu kapatmak ve alternatif enerji kaynakları konusundaki çalışmalara katkı sağlamak için yapılan bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, pilot ölçekli bir biyogaz sistemi kurularak, %40'ı büyük baş hayvan gübresi, %35'i su, %17'si peynir altı suyu ve %8'i tavuk gübresinden oluşan hammadde karışımından kofermantasyon yöntemi ile biyogaz üretilmiştir. Üretilen biyogazın bünyesindeki kirletici gazların ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ) giderilmesi amacıyla yıkama ve desulfürizasyon işlemleri uygulanmıştır. Saflaştırma işlemi sonunda %51, %57 ve %87 (M51, M57 and M87)  $CH_4$  içeriğine sahip biyogaz elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, elde edilen biyogaz yakıtlarının buji ateşlemeli bir motorda kullanılmasının performans, egzoz ve gürültü emisyonları ve yanma karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzde fosil kökenli yakıtların tükenmeye başlaması ve önemli çevresel sorunlara sebep olmalarından dolayı, alternatif enerji kaynaklarının iyileştirilmesi ve sorunsuz kullanımı konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. Alternatif enerji kaynakları konusundaki çalışmalar başta güneş, rüzgar ve biyogaz enerjisi alanlarında yoğunlaşmış ve bu kaynakların geliştirilebilmesi amacıyla yeni sistem ve uygulama yöntemleri geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Alternatif enerji kaynakları arasında yer alan biyogaz, organik atıkların havasız ortamda çürütülmesi sonucu elde edilen bir gazdır.

Biyogaz, içeriğindeki  $CH_4$  miktarına bağlı olarak ısıtma ve soğutma sistemlerinden elektrik üretimine kadar bir çok uygulamada verimli bir biçimde kullanılabilir.

Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolaydönüştürülebilmesi ve devlet desteği olması biyogazdan elektrik üretimini daha cazip hale getirmektedir. Aşağıda içten yanmalı motorlarda biyogazın kullanımı ile motor performansı, egzoz ve gürültü emisyonuyla ilgili literatür özeti verilmiştir.

Porpatham ve arkadaşları, çeşitli  $CO_2$  konsantrasyon oranlarındaki biyogazı 4,4 kW'lık buji ateşlemeli, 13:1 sıkıştırma oranına sahip tek silindirli bir motorda kullanarak, motorun performans, emisyon ve yanma karakteristiklerini tam yük koşulları altında deneysel incelemiştir. Çalışmalarda, fakir karışım oranlarında HC emisyonlarının azaldığı,  $CO_2$  içeriğinin %10 azalmasıyla motor performansının önemli oranda arttığı ve  $NO_x$  emisyonlarında önemli bir artışın olmadığı vurgulanmıştır [8].

Ravi ve arkadaşları, farklı yakıt bileşimlerinin (dizel, biyodizel (B10, B20, B30), biyodizel-biyogaz) egzoz emisyon analizörü yardımı ile egzoz emisyonları, gürültü, titreşim ve motor performansına odaklanmışlardır. Yapılan çalışmada, titreşim verileri Piezoelektrik kristal sensör ile ölçülmüştür. Çalışmada biyodizel, B20-biyogaz yakıtları, dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında fren termik veriminin çok az miktarda azaldığı belirtilmiştir. Yine aynı yakıtlar ile dizel yakıtı karşılaştırıldığında CO, CO<sub>2</sub> ve duman gibi emisyonlar çok az miktarda artarken HC ve NO<sub>x</sub> emisyonları hafifçe azalmıştır. Dizel yakıtı kullanımına göre dizel-biyodizel karışımının kullanımında titreşim ve ses azalırken, B20-biyogaz kullanımında hafifçe arttığı çalışmada bildirilmiştir[9].

Montoya ve arkadaşları, iki silindirli, dört zamanlı, 15,5:1 sıkıştırma oranına ve 7 kW çıkış gücüne sahip bir dizel motorunu modifiye ederek, çeşitli CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> oranlarında (60:40, 70:30, 80:20) ve farklı yükleme koşullarında, sistemin termik verim, CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> emisyonları, silindir içi basınç, ısı yayılım oranı (heat release fraction) ve egzoz gazı sıcaklığı değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, CH<sub>4</sub> ve yükleme oranlarındaki artışla birlikte; termik verim, CO ve NO<sub>x</sub> emisyon değerleri, silindir içi basınç ile egzoz gaz sıcaklığında artış yaşanırken CH<sub>4</sub> emisyon değerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir[10].

Lee yapmış olduğu çalışmada, çöp gazı ve içerisinde belirli oranlarda CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO bulunan sentetik gazları, jeneratör ünitesi entegre edilmiş dört zamanlı tek silindirli bir buji ateşlemeli motorda, jeneratör çıkışına 0,2– 0,4– 0,6– 0,8 kW'lık yüklerde test etmiştir. Çalışmada, farklı yakıt karışımları için CO, NO<sub>x</sub>, HC emisyon değerleri ve motor verimi incelenmiştir. Çöp gazına %0-5-10-15 oranlarında H<sub>2</sub> ilave edilerek yapılan deneylerde, H<sub>2</sub> oranı ve yükün artması ile motor verimi ve NO<sub>x</sub> emisyonu artarken HC emisyonu azalmış, CO emisyon değeri ise, 0,2-0,4 kW yük aralığında azalırken, 0,4-0,8 kW yük aralığında artış göstermiştir[11].

Porpatham yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise; tek silindirli 13:1 sıkıştırma oranına ve 1500 d/d devre sahip dizel bir motora buji ekleyerek biyogaz ile çalışabilecek şekilde modifiye ederek tam yük ve kademeli yük koşulları altında performans, yanma ve emisyonlar üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir.



Çalışmada, silindir içi türbülans oluşumunun fren termal veriminde (brake thermal efficiency) ve çıkış gücünde artışa sebep olurken HC emisyonlarının azalmasına, NO<sub>x</sub> emisyonlarının ise, artmasına sebep olduğunu belirlemiştir [12].

Jatana ve arkadaşları, 95 cc, tek silindirli, 4 zamanlı buji ateşlemeli motoru; ön karışım, sürekli enjeksiyon, tek tırnaklı ve çift tırnaklı buji olmak üzere farklı modlarda çalıştırarak, 1 kW'dan daha düşük güç üretimine sahip olan biyogaz jeneratörleri için yüksek verim stratejilerini araştırmışlardır. Çalışmada, silindir içi basınç, krank açısı, fren gücü, hava ve yakıt akış oranı ve egzoz emisyonları tespit edilerek; biyogazın yakılmasında ateşleme stratejilerinin oldukça hassas olduğu, çift tırnaklı buji kullanımının tüm yakıt durumları için daha iyi sonuçlar verdiği, sürekli enjeksiyonun düşük yüklerde daha üstün performansa sebep olduğu, 0,7 yakıt fazlalık kat sayısına denk gelen fakir karışımda 450-1000 W aralığında aşırı düşük yüklerde fren termal verimin %22-27 aralığında ve HC emisyon değerinin yaklaşık 100 ppm değerinde olduğu tespit edilmiştir[13].

Arroyo ve arkadaşları, biyogazın katalitik ayrıştırılması ile elde edilen iki synthetic gazın bir içten yanmalı motorda yakılmasıyla yanma sonuçlarını tespit etmişlerdir. Sentetik gazların ve benzinin 3 farklı hava yakıt oranında ve geniş bir devir aralığında kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada; sentetik gazın içersine hidrojen eklenme oranına bağlı olarak silindir içi maksimum basınç değerinin arttığı, sentetik gaz kullanımında yüksek hız ve fakir karışım oranlarında benzinden daha yüksek verim elde edildiği, ısı yayılım oranında hidrojen oranının güçlü bir etkisi olduğu, sentetik gaz kullanımının CO ve CO<sub>2</sub> emsiyon konsantrasyonlarını arttırdığı tespit edilmiştir[14].

Leeve arkadaşları, domuz atığından üretilen biyogazın 30 kW'lık jeneratörde kullanıldığında; hava fazlalık katsayısının, %60 ve %73 CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun ve atık ısı geri kazanım sistemiyle giriş havasının ısıtılmasının jeneratör performansına etkilerini incelemişlerdir. Güç üretimi, hava fazlalık katsayısının 0,85'in altında CH<sub>4</sub> konsantrasyonundaki artış ile doğru orantılı arttığı, hava fazlalık katsayısı 0,95'in üzerine çıktığında ise, termal verimin CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun artışı ile birlikte

arttığı, hava fazlalık katsayısının yüksek olduğunda giriş havasının ön ısıtılmasının jeneratör performansını geliştirdiği tespit edilmiştir[15].

Makareviciene ve arkadaşları, dizel yakıt ile biyogaz karışımını bir dizel motorda yakarak egsoz emisyonlarını incelemişlerdir. İki aşamalı gerçekleştirilen çalışmada, CO<sub>2</sub> konsantrasyonunun biyogazın motorda yanma karakteristiklerine olan etkileri ve yüksek CH<sub>4</sub> içeriğine sahip biyogazın enjeksiyon zamanlamasına etkisi incelenmiştir. Çalışmada, biyogaz içeriğindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun NO<sub>x</sub> emisyonlarına doğrudan etki ettiği, 2500 rpm, 60 Nm yükte yüksek CH<sub>4</sub> içeriğine sahip yakıt ile dizel yakıt karşılaştırıldığında yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> değerinde 1,5 kat azalma, CO ve HC emisyonlarında ise, önemli artışların meydana geldiği tespit edilmiştir[16].

Barik ve Murugan tarafından yapılan çalışmada, anaerobik çürüme yöntemi ile üretilen biyogaz, çift yakıt modu ile çalışan bir dizel motorda dört farklı akış oranında (0,3- 0,6- 0,9 ve 1,2 kg/h) denenmiştir. En iyi motor performansı ve düşük emisyon değerleri 0,9 kg/h akış oranı ile elde edilmiştir[17].

Byun ve Park tarafından yapılan çalışmada, biyogaz içeriğindeki CO<sub>2</sub>'nin yanma sonu sıcaklığını, silindir basıncını, ısı çıkış oranını ve yanma hızını düşürdüğü belirtilmiştir. CO<sub>2</sub> oranının %50'yi aşmasıyla, yanmanın geciktiği ve yavaşladığı belirtilmiştir[18].

Jeong ve arkadaşları ise, biyogaza H<sub>2</sub> ilavesinin hava fazlalık katsayısına bağlı olarak buji ateşlemeli bir motorun yanma basıncına ve egzoz emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. H<sub>2</sub> oranının artmasıyla alev yayılma hızının, verimin, maksimum silindir içi basıncın ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığı belirtilmiştir[19].

Luijten ve arkadaşları, elektrik üretmek için içten yanmalı bir motor jeneratör setinde yakıt olarak jatropha yağı ve biyogaz karışımını kullanmışlardır. Çalışmada, referans değerler saf jatropha yağının kullanılması ile oluşturulmuştur. Biyogaz emme manifoldu vasıtası ile yanmaya dahil edilmiştir. Yapılan çalışmada termal verim, volumetrik verim ve hava fazlalık katsayısı incelenmiştir. Yüksek yükleme koşullarında biyogaz ve jatropha yağının kullanımı ile gerçekleşen deneylerde termal

verimin hemen hemen hideğişmediği, düşük yükleme koşullarında ise, termal verimin %10'a kadar azalma gösterdiği belirtilmiştir[20].

Ray ve arkadaşları çalışmalarında, dizel yakıtına belirli oranlarda biyogaz ilavesi yaparak ufak bir dizel motorun fren termal verimi, CO ve HC egzoz emisyonlarını incelemiştir. Çalışmada, ilave edilen biyogaz miktarı attığında; fren termal verimin, CO ve HC emisyonlarının azaldığı belirtilmiştir[21].

Heidary ve arkadaşları, ufak bir dizel motorlarda farklı oranda biyodizel içeren yakıtlar (B5, B10, B15, B20, B100) kullanarak motorun titreşim ve gürültü karakteristiklerini incelemişlerdir. Çalışmada dikey ekseninde oluşan titreşimlerin büyüklüğü, diğer iki eksenenden daha fazla olduğu ve ayrıca boylamsal ekseninde oluşan titreşimin yan ekseninde oluşan titreşimden daha fazla olduğu bildirilmiştir. B100, B5 ve B20 yakıtları ile titreşim değerleri düşük çıkarken B15 ve B10 yakıtları ile maksimum değerde olduğu çalışmada belirtilmiştir [22].

## BÖLÜM 3

### İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ALTERNATİF YAKITLAR

Petrol fiyatlarının artması, fosil kökenli yakıt kaynaklarının tükenmeye başlaması, artan taşıt sayısı, egzoz emisyonu kaynaklı sera gazı oluşumu, taşıtların ve endüstride kullanılan jeneratörlerin çevresel etkileri ve taşıt üreticilerine getirilen egzoz emisyon kısıtlamaları içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt kullanımını zorunlu hale getirmiş ve bu alanda çalışmaların artmasına sebep olmuştur. Günümüzde hidrojen, LPG, biyogaz, alkol esaslı yakıtlar, çeşitli bitkisel yağlar ve bunların farklı yakıtlarla karışımları içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmakta, kullanılmaya çalışılmakta ve kullanılabilirlikleri araştırılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan bazı alternatif yakıtlar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. İçten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlar.

Motor Türü	Yakıtlar
SI motor	Hidrojen
	Etanol
	Metanol
	LPG
CI motor	Biyodizel
CI ve SI motor	Biyogaz
	LNG
	CNG
	Bitkisel yağlar

#### 3.1. HİDROJEN

Sudan havaya kadar birçok çeşitte üretim kaynağı bulunan hidrojen sentetik bir yakıt olup gaz ve sıvı olarak kullanılabilir. Alternatif yakıt olarak kullanılabilen hidrojen

ayrıca güneş, rüzgar, jeotermal veya biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla farklı yöntemler kullanılarak ta üretilebilir [23]. Çizelge 3.2’de hidrojenin yakıt özellikleri verilmiştir [23].

Çizelge 3.2. Hidrojenin yakıt özellikleri.

Özellik	Hidrojen
Kimyasal Formül	H <sub>2</sub>
Ateşlenme Sıcaklığı (°C)	585
Hava içine difüzyon katsayısı (cm <sup>2</sup> /s)	0.61
Hava içerisinde hacimsel olarak tutuşma sınırı (%)	4-75
Yoğunluk (gaz) (kg/m <sup>3</sup> )	0,084
Alev Yayılması (%)	17-25
Alev Sıcaklığı (hava içerisinde) (°C)	2045
Özgül ısısı (sabit basınçta) (J/gK)	14,89
Alt ısı değeri (kJ/g)	119,93

Çizelge 3.2’den de görülebileceği gibi hidrojen, hava içerisinde hacimsel olarak %4 ile %75 oranlarında bulunduğu takdirde tutuşma gerçekleşebilir. Hidrojen-havakarışımı için hava fazlalık katsayısı 0,14-4,35 gibi oldukça geniş bir aralıktadır. Hidrojen-havakarışımı için hava fazlalık katsayısı aralığı benzin-hava ve metan-hava karışımları için hava fazlalık katsayısı aralığından daha geniştir [23]. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımının avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

Avantajlar:

- Çevre dostu ve bol bulunabilen bir enerji kaynağıdır.
- İçeriğinde karbon ihtiva etmediğinden, fosil kökenli yakıtlara göre emisyon değerleri daha çevrecidir.
- Hidrojen uçuculuğunun yüksek olması sebebiyle herhangi bir sızıntı esnasında sistemden hızla uzaklaşarak daha güvenli bir sistem sunar.
- Ufak değişiklikler ile buji ateşlemeli bir motor hidrojen ile çalışır hale gelebilir [24].

Dezavantajlar:

- Depolama problemi.
- Geri yanma problemi.
- Erken tutuşma problemi.

### 3.2.ALKOL ESASLI YAKITLAR

Alkoller (metanol ve etanol) genel olarak saf olarak ya da belirli oranda benzin ve dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılabilir. Alt ısıl değeri dizel yakıtından daha düşük olduğu fren özgül yakıt tüketiminde (FÖYT) artışa motor gücünde ve torkunda azalma olmaktadır. Alkol esaslı yakıtların kullanımında CO emisyonu, dizel yakıtının kullanımında oluşan CO emisyonundan daha düşük çıkmaktadır. Alkoller içeriğinde kükürt (S) bulundurmadığı için egzoz emisyonları içerisinde SO<sub>2</sub> azaltmaktadır. Ayrıca, alkol esaslı yakıt kullanımı is ve partikül miktarında da azaltma sağlamaktadır. Metanol ve Etanolün yağlayıcı özelliği dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında daha azdır. Bu nedenle, metanol ve etanol kullanım yakıt sistemindeki pompa ve enjektörlerde aşınmaya sebep olabilmektedir. Metanol ve etanolün viskozitesi düşük olduğundan enjektörlerde sızıntıya neden olabilir. Çizelge 3.3'te metanol ve etanol yakıtının özellikleri verilmiştir [25].

Çizelge 3.3. Metanol ve etanol yakıtının özellikleri.

Özellik	Metanol	Etanol
Kimyasal formül	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Yoğunluk (15 °C'de) (kg/m <sup>3</sup> )	796	790
Kaynama noktası (°C)	64,7	78,37
Buhar basıncı (kPa) (38°C'de)	32	15,9
Oksijen konsantrasyonu (% kütleli)	49,9	34,7

Metanol ve etanol yakıtının avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Avantajlar:

- Alkol esaslı yakıtların oktan sayıları benzine kıyasla daha fazla olduğundan içten yamalı motorlarda vuruntu olmaksızın sıkıştırma bir miktar daha artırılabilir.
- Benzin ile karıştırıldığında karışımın oktan sayısı artar.
- Benzin ile karşılaştırıldığında alkol esaslı yakıtlar daha fakir karışım bölgesinde çalışabilir.

Dezavantajlar:

- Benzinden alkol esaslı yakıtı çevrilen bir motorun yakıt sistemindeki filtrelerinde tıkanmalara sebep olabilir.
- Bazı yakıt sistemi parçaları alkol esaslı yakıt kullanımında deformasyona uğrayabilir.
- İlk çalıştırmada zorluk yaşanabilir.
- Alkol esaslı yakıtların nem tutma özelliği sebebiyle kullanımında, depolanmasında ve dağıtımında nem almayacak şekilde tedbirlerin alınması gereklidir [26].

### 3.3. LPG

Alternatif yakıtlarda aranan en önemli özelliklerden bir tanesi de mevcut sistemde aşırı bir değişikliğe gitmeden, ufak değişikliklerle kullanılabilir olmasıdır. İçeriğinde, %30-50 propan ve %70-50 bütandan oluşan LPG, benzinli motorlara ufak eklemelerle kullanımı mümkündür. LPG'yi oluşturan bütan ve propanın özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir [27].

Çizelge 3.4. Bütan ve propanın özellikleri.

Özellik	Bütan	Propan
Kimyasal formül	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Sıvı yoğunluk (15 °C'de) (kg/cm <sup>3</sup> )	582	504
Kaynama noktası (°C)	-0,5	-42,3
Buhar basıncı (kPa) (20 °C'de)	100	920
Alt ısı değeri (MJ/kg)	46,400	45,600

LPG'nin motor yakıtı olarak kullanımında avantajları:

- Motor yağ ömrünü uzatır.
- Egzoz emisyon değerleri benzine göre daha azdır.
- Sistem bakımı azdır.
- Oktan sayısı yüksektir.
- Yakıt fiyatı benzine göre daha ucuzdur.

LPG'nin motor yakıtı olarak kullanımında dezavantajları:

- Depolanması ve dağıtımı benzine ve dizele göre daha zordur.
- LPG sistemi taşıt ağırlığını artırır.
- Bagaj içerisine yerleştirilen LPG tankı bagaj hacmini azaltır.
- Gaz fazında motora girmesi volümetrik verimi düşürür.

### 3.4. CNG

Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG)'nin dizel ve benzin yakıtlarına göre daha düşük emisyon değerlerine sahip olması, yüksek oktanlı değerine sahip, ekonomik, çevreci ve kolay bulunması sebebiyle içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak önemli ölçüde kullanıma sahiptir [28]. Otobüs, tır ve kamyonlarda kullanımı yaygındır ve kullanımı desteklenmektedir. CNG'nin çok büyük bir bölümünü metan oluşturur ve içeriğinde; etan, propan, bütan, azot, pentan ve karbondioksit gibi gazlar bulunur. Çizelge 3.5'de CNG'yi oluşturan gazların hacimsel yüzdeleri verilmiştir [29].



Çizelge 3.5. CNG'yi oluşturan gazların hacimsel yüzdeleri.

CNG Bileşenleri	Kimyasal formülü	Hacimsel miktarı (%)
Metan	CH <sub>4</sub>	92,98 (En az)
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4,04 (En fazla)
Azot	N <sub>2</sub>	1,62 (En fazla)
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	1,19 (En fazla)
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,17 (En fazla)
Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,59 (En fazla)

CNG kullanımının avantajları:

- Motor yağının ömrünü uzatır.
- Havadan daha hafif olduğundan bir sızıntı anında atmosfere hızla karışarak sistemi daha güvenli hale getirir.
- Geleneksel yakıtlardan emisyon değeri çok daha düşüktür.
- Gürültü emisyonu geleneksel yakıtlardan daha düşüktür.
- Motor ve filtrelerin ömrünü uzatır.
- Daha ekonomiktir.

CNG kullanımının dezavantajları:

- Dolum istasyonları için daha yüksek yatırım gerekir.
- Dolum süresi geleneksel yakıtlara göre daha fazladır.
- Bir miktar güç ve menzil kaybına yol açabilir.
- Bagaj hacmi küçülür ve araca ek yük getirir.

### 3.5. BİYODİZEL

Biyodizel CI motorlarda kullanılması için biyokütleden (atık yağlardan, bitkisel ve hayvansal yağlardan) elde edilen yakıt türüdür. Biyodizel tek başına yada dizel yakıtı belirli oranlarda eklenilmesi ile içten yanmalı motorlarda büyük değişiklikler yapılmaksızın kullanılabilir. Üretilen hammaddeye göre biyodizelin özelliği değişse

de biyodizel için birçok standart oluşturulmuştur. Biyodizelin Avrupa Standartlarına(EN 14214)görebazı özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir [30].

Çizelge 3.6. Biyodizel için Avrupa standartlarına göre bazı özellikleri.

Yakıt özellikleri	Test metodu	Biyodizel
Yoğunluk (15 °C'de) (kg/m <sup>3</sup> )	EN ISO 3675	860-900
Kinematik viskozite, (15 °C'de), (cst)	EN ISO 3104	3,5-5
Alevlenme noktası, (°C), (en az)	ISO/CD 3679	101
Soğukta tıkanma filtre noktası, (°C)		
15 Nisan-30 Eylül	DIN EN 116	0
1 Ekim-15 Kasım		-10
16 Kasım- 28 Şubat		-20
Setan sayısı, (en az)	EN ISO 5165	51

Biyodizelin avantajları:

- Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır.
- Petrol bağımlılığını azaltır.
- Biyodizel kullanımında SO<sub>x</sub>, CO ve partikül emisyonu azalır.
- Zehirli bir yapıya sahip değildir.
- Atık geri dönüşümü sağlar.
- Dizel yakıtına göre depolanması ve taşınması daha güvenlidir.
- Dizele göre daha yüksek setan sayısına sahip olması daha az vuruntulu çalışmayı sağlar.

Biyodizelin Dezavantajları:

- Bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel, yüksek viskoziteye sahip olması yakıt sisteminde problem teşkil edebilmektedir.
- Biyodizelin alt ısıl değeri dizel yakıtına göre daha düşük olduğu için bir miktar performans kaybı söz konusudur.
- Yakıt sisteminin biyodizele uygun olması gerekir.

- Motor yağının seyrelmesine sebep olabilir [30,31].

### **3.6. BİYOGAZ**

Biyogazın yüksek oktan sayısına sahip oluşu, biyolojik atıklardan, tarımsal atıklarından ve hayvansal atıklardan elde edilerek atıkların tekrar geri kazanılması sebebiyle biyogaz içten yanmalı motorlarda kullanımı gerçekleştirilmekte ve teşvik edilmektedir. Biyogaz üretiminden sonra bir takım saflaştırma işlemine tabi tutulduktan sonra hem CI hem de SI motorda kullanılabilir. Buji ateşlemeli motorda benzin karbüratörü yerine, bir biyogaz karbüratörü eklenmesi ile biyogaz benzinli motorda rahatlıkla kullanılabilir [32]. Biyogaz sıkıştırma ile ateşlemeli motorda iki yöntemle kullanılabilir. Birincisi, dizel motora buji ve ateşleme sistemi eklenmesiyle, ikincisi ise, dizel motorda çift yakıt kullanımıyla gerçekleştirilebilir. Dizel motoruna benzinli motordaki gibi buji ilavesi ile dizel motor tamamen biyogaz ile çalışır hale gelir, motor orijinal parçalarını ve gücünü korur [33]. Dizel motorun çift yakıtla çalışması, bir gaz karbüratörünün emme manifoldu ile hava filtresi arasına eklenmesi ile sağlanabilir. Kompresyon oranına göre uygun oranda biyogaz silindirlere gönderilerek dizel motor çift yakıt ile çalışır duruma gelebilir.

## BÖLÜM 4

### BİYOĞAZ

#### 4.1. BİYOĞAZIN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Anaerobik fermentasyonla ilk biyogaz üretimi M.Ö. 10. yüzyılda Asurlular tarafından su ısıtmak amacı ile kullanılmıştır. 17. yüzyılda Jan Baptita Von Helmont organik maddelerin havasız ortamda çürümesi ile yanabilen bir gazın ürediğini ortaya koymuştur. 17. yüzyılın sonlarında Kont Alessandro Volta çürüten organik madde ile yanabilen gaz arasındaki bağıntıyı göstermiştir. 18. yüzyılda Sir Humohery Davy anaerobik fermentasyonla büyük baş hayvan atığından da metan üretilbildiğini belirtmiştir. İlk modern biyogaz fermentörü 1859 yılında Hindistan'da kurulmuştur. 1930'lu yıllarda Buswell ve arkadaşları metan bakterilerini tanımlamış ve koşulların oluştuğunda metan üretiminin bu bakterilerce gerçekleştirilebildiğini belirlemişlerdir[34–36].

Biyolojik atıklar kullanılarak üretilen biyogazın yapısı biyogazın elde edildiği hammaddenin türüne ve fermentasyon şekline bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 4.1'de anaerobik fermentasyonla üretilen biyogazın bileşenleri verilmiştir[5,37,38].

Çizelge 4.1. Biyogaz bileşenleri.

Bileşen	Sembol	Yüzde
Metan	CH <sub>4</sub>	50-70
Karbondiyoksit	CO <sub>2</sub>	30-50
Hidrojen	H <sub>2</sub>	5-10
Nitrojen	N <sub>2</sub>	<1
Su buharı	H <sub>2</sub> O	<0,3
Hidrojen Sülfür	H <sub>2</sub> S	<3

Biyogaz içeriğinin büyük bir kısmını oluşturan CH<sub>4</sub> gazı kokusuz bir gaz olmasına karşın, H<sub>2</sub>S ve diğer gazların içeriğinden dolayı biyogaz sarımsak ve çürümüş yumurta kokusuna benzer bir kokuya sahiptir. Biyogazın yoğunluğu ve yanma için gerekli hava miktarı, biyogazın içeriğindeki CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonları ile değişir. Biyogazın enerji içeriği, gaz formunda bulunan birçok enerji kaynağına göre daha düşüktür. Hava ile hızlı karıştığı için ani patlama ve yanma tehlikesi azdır[37]. 1m<sup>3</sup> biyogaza eşdeğer yakıt miktarları Çizelge 4.2’de verilmiştir[6,37,39].

Çizelge 4.2. 1 m<sup>3</sup> biyogaza eşdeğer yakıt miktarları.

Miktar	Yakıt	Miktar	Yakıt
= 0,66 lt	Motorin	= 0,62 lt	Gazyağı
= 0,75 lt	Benzin	= 1,46 kg	Odun kömürü
= 0,25 m <sup>3</sup>	Propan	= 3,47 kg	Odun
= 0,43 m <sup>3</sup>	Bütan	= 12,3 kg	Tezek
= 0,85 kg	Kömür	= 4,7 kWh	Elektrik enerjisi

Biyogaz, bir enerji kaynağı olarak birçok avantaja sahiptir ve bu avantajlardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

- Sürdürülebilir, çevre dostu ve ucuz bir enerji kaynağıdır.
- Çeşitli organik atıkları hammadde olarak kullanılmasıyla atık geri kazanımı sağlar.
- Biyogaz üretiminde kullanılan gübre kokusu hissedilmeyecek ölçüde azalmaktadır.
- Gübre kaynaklı insan sağlığı ve yer altı sularını tehdit eden hastalık yapıcı etmenlerin etkinliğinin yok olmasını sağlar.
- Üretim sonrasında atıklar daha değerli olan organik gübreye dönüşür.
- Fermentasyon sonrasında hayvan gübresinde içerisinde bulunabilecek yabancı ot ve bitki tohumları çimlenme özelliğini kaybeder [37].

## 4.2. DÜNYA VE TÜRKİYE'DE BİYOGAZIN YERİ

Çin'de toplam nüfusun %80'i, Hindistan'da ise toplam nüfusun %70'i, kırsal kesimde yaşamaktadır[35,40–42]. Bu sebeple, Dünya'da kurulu hayvansal atıktan biyogaz üretim tesislerinin %80'i Çin'de, %10'u Hindistan, Nepal ve Tayvan'da ve geri kalanı diğer ülkelerde kuruludur[43]. Çizelge 4.3' de Çeşitli ülkelerde kurulu biyogaz tesis sayıları verilmiştir[37,43,44].

Çizelge 4.3.Çeşitli ülkelerde kurulu biyogaz tesis adetleri.

Ülke	Mevcut Tesis Sayısı
Çin	7000,000
Hindistan	2900,000
Nepal	49,500
Kore	29,000
Brezilya	2300

Çizelge 4.4'de Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde hayvan gübresi kullanılarak biyogaz üreten tesis sayısı verilmiştir[43,44]. AB ülkelerinde hayvansal atıktan biyogaz üretim tesis sayısı ve biyogaz üretim miktarı göz önüne alındığında, 2200 tesis ile Almanya en fazla üretim yapan ülke konumundadır. Almanya'da biyogaz tesislerinin yapımı 1993 yılından itibaren artmış ve yine aynı yıldan günümüze kadar 139 tesisten 2200 tesise kadar çıkmıştır[6].

Türkiye'de 1957 yılında Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü'nde biyogaz ile ilgili ilk çalışmalar yapılmıştır. 1960'lı yıllarda pilot tesislerde denemeler yapılmıştır. 1980'li yıllarda Köy Hizmetleri Ankara Araştırma Enstitüsü'nde çalışma ekipleri oluşturulmuştur. Her ilde 3 adet, bölge merkezlerine 5 adet biyogaz tesisi kurulumu planlanmış ve işletmeye açılmıştır. Özel girişimler için, teknik destek ve kredi yardımı sağlanmaya çalışılmış, ancak yeterli bir eğitim, danışacak kurum ya da kişi bulunamadığından tesisler işletilememiştir [35,37,45–47].

Çizelge 4.4. ABülkelerinde kurulu biyogaz tesisi sayısı ve üretim miktarları.

Ülke	Mevcut Tesis Sayısı	Biyogaz Üretim Miktarı (TWh/yıl)
Almanya	2200	-
Avusturya	>90	1,410
İtalya	70	6,880
İsviçre	59	1,790
Danimarka	39	45,150
İngiltere	31	-
Portekiz	16	1,520
İsveç	12	19,430
İspanya	6	0,026
Norveç	4	0,620
Hollanda	3	1,960

Türkiye’de sadece hayvansal atıkların kullanılması ile 2000 adet biyogaz tesisi çalıştırılabilir kapasiteye sahip iken Türkiye’de 85 adet biyogaz tesisi bulunmaktadır ve bu sayının sadece 36 adedi aktif durumdadır[48,49]. Çizelge 4.5’te sektörlere göre biyogaz tesislerinin dağılımı ve toplam kurulum kapasiteleri verilmiştir[49]. Çoğu biyogaz tesisi çöp gazı veya atık su arıtma tesisi olmak üzere genellikle Türkiye’nin batısına konumlanmışlardır. Ek açıklama B’de Türkiye’deki işletmede ve planlamada olan biyogaz tesis sayıları verilmiştir[49].

Çizelge 4.5. Sektörlere göre biyogaz tesislerinin dağılımı ve toplam kurulum kapasiteleri.

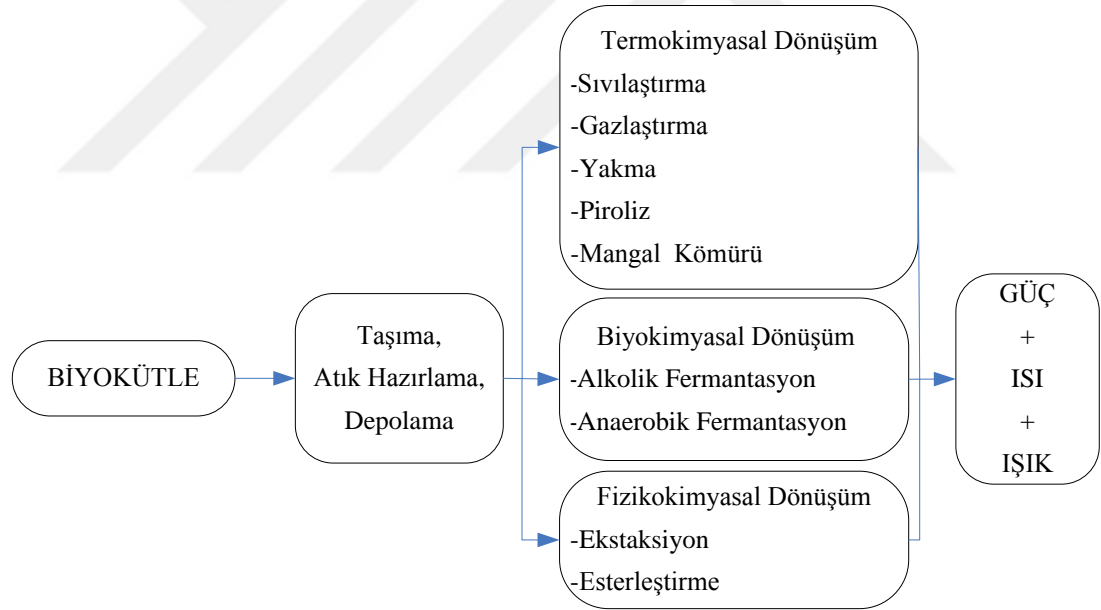
	İşletme halindeki tesisler	İşletmedeki kapasite (MW)	Planlamada ki tesisler	Planlamada ki tesis kapasitesi (MW)	Toplam biyogaz tesisleri	Toplam kapasite (MW)
Tarım (hayvansal atıklar, bitkiler)	2	0,68	12	11,99	14	12,58
Gıda sanayi (atık su, organik atık)	17	13,68	2	3,88	19	17,56
Belediye (çöp gazı, atık su)	17	96,98	12	34,72	29	131,70
Belediye (çöp gazı)	13	93,04	9	32,03	22	125,08
Belediye (atık su)	4	3,94	3	2,69	7	6,62
Sınıflandırılmamış	0	0	23	61,16	23	61,16
Toplam	36	111,23	49	111,76	85	222,99

### 4.3. BİYOKÜTLEDEN ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Biyokütle ve diğer organik atıklar çeşitli ön işlemlerden geçirilerek ısı ve elektrik enerjisi üretmek mümkündür. Bu amaçla;

- Termokimyasal dönüşüm,
- Fiziko-kimyasal dönüşüm,
- Biyokimyasal dönüşüm gibi yöntemler kullanılabilir.

Günümüzde, enerji üretmek amacıyla kullanılan atıkların büyük bir kısmı termokimyasal yöntemle ısı ve elektrige dönüştürülmektedir [50]. Şekil 4.1'de biyokütle ve organik atıklardan enerji dönüşüm yöntemleri verilmiştir [50].



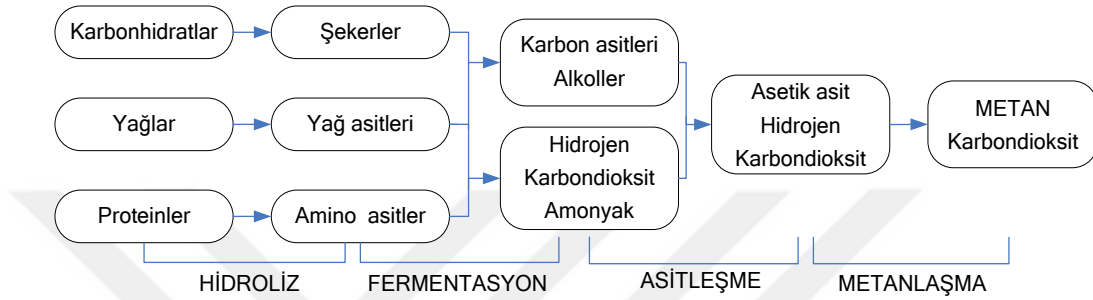
Şekil 4.1. Biyokütle ve organik atıklardan enerji dönüşüm yöntemleri.

Biyokimyasal dönüşüm yöntemlerinden anaerobik fermantasyon, oksijensiz bir ortamda ve uygun koşulların oluşması durumunda karışık bakteri kültürlerinin yardımı ile organik maddelerin ayrışması esasına dayanan çok aşamalı biyolojik bir süreçtir. Kimyasal tepkimeler  $\text{CH}_4$  ve  $\text{CO}_2$  ağırlıklı olmakla birlikte  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  ve  $\text{NO}_2$  gazlarını bünyesinde bulunduran bir gaz ürünü oluşturur. Atmosfer ve çevre dengesi için önemi büyük olsa da, kimyasal tepkimenin oluşum mekanizması ve farklı



mikroorganizma türlerinin birbirleriyle olan etkileşimleri hala tam bir şekilde ortaya konulamamıştır [34,36].

Anaerobik fermentasyon ile biyogaz üretimini hidroliz, fermentasyon, asitleşme, metanlaşma olmak üzere dört ana başlıkta toplamak mümkündür. Anaerobik fermentasyonun aşamaları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Anaerobik fermentasyon aşamaları.

#### 4.3.1. Hidroliz

Karmaşık moleküllerin kimyasal bağlarının bakteriler tarafından kırılması “lysis” ve su eklenmesi “hydro” kelimelerin birleştirilmesiyle hidroliz kelimesi oluşmuştur [51]. Organik maddelerin daha kolay kullanılması için hidroliz aşamasında daha küçük parçalara çevrilmesi sağlanır. Organik materyalin içeriğindeki protein, karbonhidrat, yağ gibi fiber yapıdaki makro moleküller bu aşamada şeker, yağ asidi ve amino aside dönüşür [52]. Protein ve özellikle de yağların hidrolizi birkaç gün içinde gerçekleşirken, karbonhidratların hidrolizi birkaç saat sürebilir [36]. Hidroliz aşamasındaki reaksiyonlar bakteri ve substratın etkin temasıyla ilgili olduğundan, karıştırma işlemi hidroliz aşamasını hızlandırır. Fermentör içine alınan organik maddeden CH<sub>4</sub> üretmeden önce, organik maddenin bakteriler için hazır hale gelmesi gerekir. Bu sebeple, hidroliz aşaması CH<sub>4</sub> üretiminde hız belirleyici bir adımdır ve hidroliz aşaması ne kadar uzun sürerse hidroliz bekleme ve fermentasyon fazına geçiş süresi o kadar uzun sürer.

### **4.3.2. Fermantasyon**

Fermantasyon aşaması anaerobik fermantasyon aşamaları arasında reaksiyonun en hızlı olduğu kısımdır. Hidroliz aşamasında şeker, yağ asidi ve amino asit vb. bileşiklere dönüşen organik materyal, fermantasyon aşamasında karbon asitleri, alkoller, hidrojen, karbondioksit ve amonyak gibi ara metabolitlere fermente olmaktadır. Fermantasyon aşamasında asidojenik bakteriler fakültatifanaerob olmaları sebebi ile ortamda bulunan oksijenden faydalanarak anaerobik koşulları sağlamaya yardımcı olurlar. Sağlanan oksijensiz ortam asidojenik bakterilerin hızla çoğalmasını sağlar. Asidojenik bakteriler 3 ile 70 °C sıcaklık aralığında aktif halde bulunurlar [36].

### **4.3.3. Asitleşme**

Asitleşme, adından da anlaşıldığı gibi, bu aşamanın en önemli ürünlerinden biri asetik asidin iyonize formu olan asetattır. Asitleşme fazı anaerobik fermantasyon sürecinde amaç olan metanlaşma için gereken substratı sağlar [36]. Fermantasyon aşamasında karbon asitleri, alkoller, hidrojen, karbondioksit ve amonyak gibi ara metabolitlere fermente olan organik moleküller bu aşamada; valerik asit, bütirik asit, propiyonik asit ve asetik asit gibi organik asitlere ve metanole dönüştürülürler.

### **4.3.4. Metanlaşma**

Metanlaşma aşamasında, metan bakterileri görev yapmaktadır. Metan bakterileri “metanojenler” yer üstünde, bataklıkta ve göllerin kara çamurlarında bulunduğu gibi insan ve hayvanların sindirim ürünlerinde bulunabilir [36]. Metan bakterilerinin büyüme hızında sıcaklık etkilidir. Ayrıca, metan bakterilerinin düşük büyüme hızı sebebi ile metanlaşma aşaması yavaş gelişen bir adımdır. Metan bakterileri, asitleşme aşamasında oluşan organik asitleri kullanarak biyolojik bir gaz üretirler.

## **4.4. ANAEROBİK FERMANTASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER**

Anaerobik fermantasyon organik maddelerin ayrışması esasına dayanan çok aşamalı biyolojik bir süreçtir. Bu biyolojik süreçte, farklı tür mikroorganizmaların işlevlerini yerine getirebilmeleri için gereksinimleri ve ihtiyaç duyulan koşulların oluşturulması gerekmektedir. Anaerobik fermantasyonda verimin maksimum olabilmesi için aşağıdaki parametreler optimize edilmelidir.

- Reaktör sıcaklığı
- Hidrolik bekleme süresi
- Organik yükleme oranı
- Karıştırma
- Reaktör içi basınç
- Köpük oluşumu ve etkisi
- Asitlik ve bazlık derecesi (pH değeri)
- Karbon azot oranı (C/N oranı)

#### **4.4.1. Reaktör Sıcaklığı**

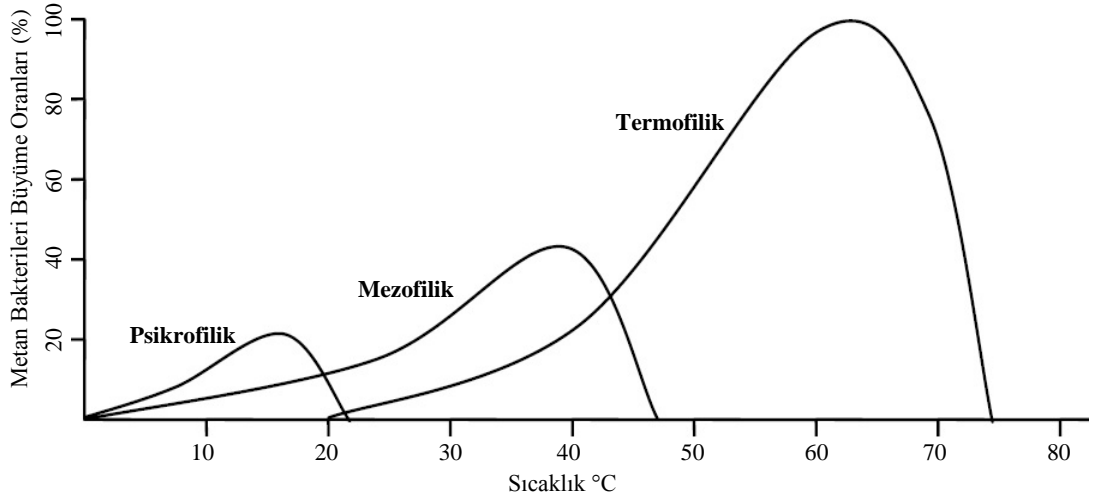
3 ile 70°C gibi geniş bir sıcaklık aralığında anaerobik fermantasyon gerçekleştirilebilir [53]. Metan üreten bakterilerin miktarı sıcaklık ile birlikte artar. Bu sebeple, sıcaklığın artması fermantasyon süresinin kısalmasını sağlar [54]. Anaerobik fermantasyonda metan üreten bakterilerin sıcaklık tercihinine göre genellikle üç sıcaklık bölgesi tanımlanır;

<20°C altındaki sıcaklık değerleri için Psikofilik Fermentasyon

20°C -40°C arasındaki sıcaklık değerleri için Mezofilik Fermentasyon

>40°C üzerindeki sıcaklık değerleri için Termofilik Fermentasyon gerçekleşir [53].

Psikofilik fermantasyonda ortalama bekletme süresi 100-300 gün iken, Mezofilik fermantasyonda ise, bu süre 20-40 gün arasında değişir [53,55]. Şekil 4.3'te metan bakterilerinin sıcaklığa bağlı olarak büyüme oranları verilmiştir.



Şekil 4.3. Metan bakterilerinin sıcaklığa bağlı olarak büyüme oranları.

Biyogaz sistemlerinde ekonomik sebeplerden ötürü genellikle mezofilik fermentasyon tercih edilmektedir. Mezofilik bölge için optimum sıcaklık 35-37°C'dir [56]. Biyogaz üretiminde sıcaklık hayati öneme sahip olup, anaerobik fermentasyonda büyük sıcaklık değişimleri toksik etkiye neden olarak metan üreten bakterilerin faaliyetini durdurabilir. Fermentasyonu etkilemeyecek sıcaklık değişimleri;

Psikofilik fermentasyonda  $\pm 2$  °C/h,

Mezofilik fermentasyonda  $\pm 1$  °C/h,

Termofilik fermentasyonda  $\pm 0,5$ °C/h aralığındadır [57].

Biyogaz üretiminde, sıcaklık değişimleri biyogaz üretimini doğrudan etkilemesi biyogaz tesislerinde fermentör sıcaklıklarının kontrolünü zorunlu kılmaktadır. Termofilik şartlarda bakteriler sıcaklık değişimlerine karşı daha duyarlı olduklarından termofilik şartlarda çalışan biyogaz tesislerinin daha hassas sıcaklık kontrolü gerekmektedir.

#### 4.4.2. Hidrolik Bekleme Süresi

Bir biyogaz tesisindeki, fermentör hacminin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de hidrolik bekleme süresidir (HBS). HBS matematiksel olarak, fermentöre giren organik maddenin fermentörden çıkıncaya kadar, fermentör

içerisinde geçirdiği ortalama süredir. HBS hesaplanırken fermentör hacmi, her gün eklenen hidrolik madde miktarı ile ilişkilendirilir [58]. HBS gün olarak verilir ve Eşitlik 4.1 ile tespit edilir.

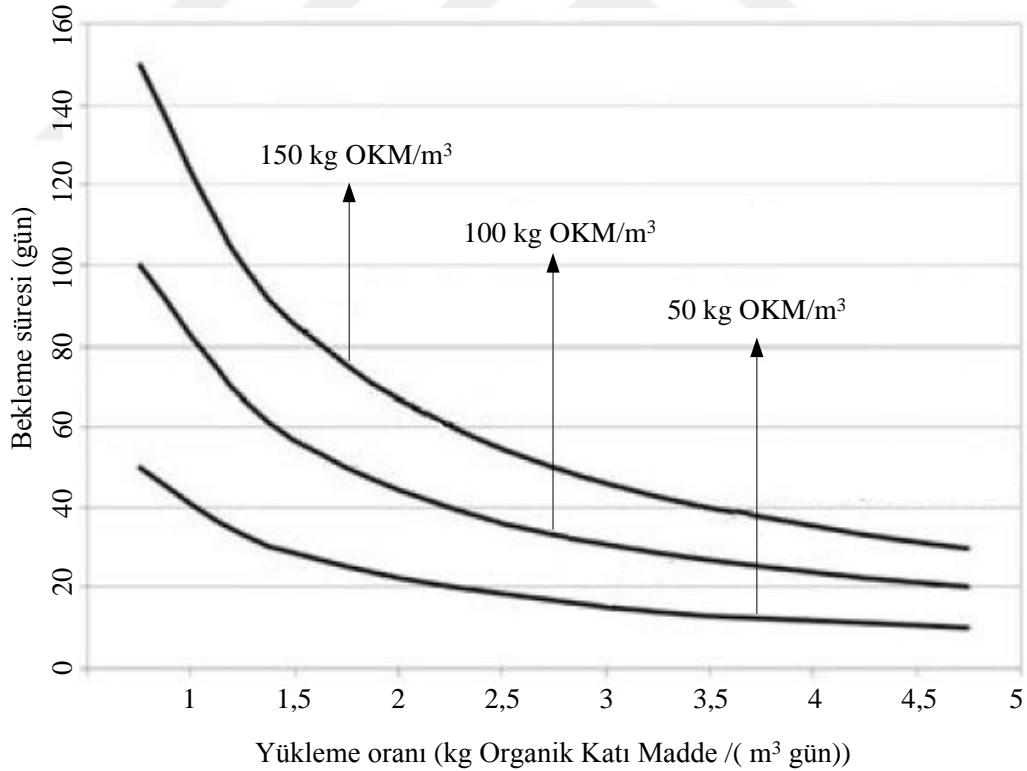
$$HBS = \frac{V_f}{\dot{V}} \quad (4.1)$$

Burada;

$V_f$  : Fermentör hacmi ( $m^3$ )

$\dot{V}$  : Fermentöre günlük yüklenen organik madde hacmi ( $m^3/gün$ )

Gerçekte, HBS değeri Eşitlik 4.1 ile belirlenen değerden farklı olabilmektedir. Çünkü, fermentöre giren organik materyal karıştırmanın etkisi ile fermentörden daha erken atılabilir. HBS ile yükleme oranı arasında Şekil 4.4’de gösterildiği gibi yakın bir ilişki bulunmaktadır [59].



Şekil 4.4.Farklı organik madde yükleme oranı ile HBS arasındaki ilişki.

HBS uzun seçilirse, fermentör içerisine giren organik materyalden belirli süre sonra yetersiz gaz verimi elde edilecektir. Ayrıca, uzun HBS seçimi fermentör hacimini

büyüteceğinden ilk yatırım maliyetini arttıracaktır. HBS'nin kısa seçilmesi organik materyalden tam olarak yararlanmadan, fermentör dışına atılmasına sebep olur. Bu sebepler ile, HBS kullanılacak organik materyal özelliklerine uygun seçilmelidir. Seçilen HBS içinde besi maddelerinin %70-80 oranında biyokimyasal reaksiyona girerek bertaraf olduğu kabul edilir [43]. Çizelge 4.6'da organik materyallerin mezafolik şartlar altında HBS değeri verilmiştir[43,60,61].

Çizelge 4.6. Organik materyallerin mezafolik şartlar altında HBS değeri.

<b>Organik Materyal</b>	<b>HBS değeri (Gün)</b>
Sıvı domuz gübresi	10-25
Büyükbaş hayvan gübresi	12-30
Saman yataklı büyükbaş hayvan gübresi	18-36
Sıvı tavuk gübresi	20-40
Bitki- büyükbaş hayvan gübresi karışımı	50-80

#### 4.4.3. Organik Yükleme Oranı

Biyogaz tesislerinin yapımında ekonomik faktörler ön planda olduğundan, fermentör hacminin seçiminde her zaman hammaddede bulunan organik kütlelerin tamamen bozunması veya azami gaz verimi hedeflenmemektedir. Organik kütlelerin tümüyle bozunması istendiği takdirde, organik kütle çok uzun süre fermentörde bekleyeceği için daha büyük fermentör hacmine ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı organik kütlelerin bozulması şayet mümkünse çok uzun zaman almaktadır. Bu sebeple, karşılanabilir bir ekonomik maliyet için optimum bozunma performansı sağlanmalıdır. Bu nedendir ki, organik yükleme oranı (OYO) işletmede önemli bir parametredir. OYO fermentörün birim çalışma hacmine bir zaman dilimi için kaç kilogram organik kuru madde beslemesi yapılması gerektiğini belirler [59]. OYO genel olarak kg OKM/(m<sup>3</sup> gün) olarak verilir ve Eşitlik 3.2 kullanılarak tespit edilir.

$$OYO = \frac{\dot{m} \cdot c}{100 \cdot V_f} [\text{kg OKM}/(\text{m}^3 \cdot \text{gün})] \quad (3.2)$$

Burada;

OYO : Yükleme oranı,

$m$  : Birim zamanda eklenen organik madde miktarı [kg/gün],

$c$  : Organik madde konsantrasyonu [% OKM],

$V_f$  : Fermentör hacmi [ $m^3$ ] değerlerini ifade etmektedirler.

#### 4.4.4. Karıştırma

Fermentör içerisindeki organik kütlenin karıştırılması biyogaz üretimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Fermentör içerisinde;

- Metan üreten bakterilerin ürettiği metabolitlerin dağıtılması,
- Fermentöre alınan organik materyalin homojen olarak karışması,
- Heterojen bir yapıya ve çökelmeye engel olunması,
- Sıcaklık dağılımının homojen olarak sağlanması,
- Fermenter içinde bir bakteri popülasyonunun iyice dağılması,
- Fermenter içinde heterojen ölü bölgelerin oluşmaması için karıştırma işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir.[37].

Günümüzde, biyogaz tesislerinde; hidrolik karıştırma, pnömatik karıştırma ve mekanik karıştırma sistemleri kullanılmaktadır.

#### 4.4.5. Reaktör İçi Basınç

Fermentör içerisinde oluşan basınç, anaerobik bakterileri etkileyerek biyogaz üretim verimini de etkiler. Yapılan bazı çalışmalarda, fermentör içi 0,75-1,5 kPa mutlak basınç aralığının biyogaz üretimi için ideal olduğu, daha yüksek basınç değerlerinin biyogaz üretimini olumsuz şekilde etkileyeceği bildirilmesine rağmen, bazı çalışmalarda fermentörün alt kısmında bulunan metan bakterileri oldukça büyük hidrolik basınç altında bir performans düşüklüğü oluşmadan faaliyetlerini sürdürdükleri rapor edilmiştir [35,62,63]. Ayrıca, basınç yükseldiğinde metandan

çözünebilirlik özelliği 40 kat fazla olan CO<sub>2</sub> sıvı içerisinde çözüldüğünden biyogaz içerisindeki metan oranı artmaktadır [35,64].

#### **4.4.6. Köpük Oluşumu Ve Etkisi**

Hayvansal atığın bünyesinde bulundurduğu hayvan kılları, çim, sap ve saman parçaları, gibi materyaller, gaz çıkışı hızlandığında ve karıştırmanın da etkisiyle, fermentör yüzeyine birikir ve köpük tabakası oluşur. Gerekli karıştırma yapılmadığında yüzeyde tabaka halini alır. Yüzeyde oluşan köpük tabakası biyogaz üretim tesislerinde gaz hatlarını ve basınç emniyet düzeneklerini tıkamak sureti ile büyük problemler oluşturabilir. Bu sebeple, köpük oluşumunun engellenmesi veya giderilmesi gereklidir. Köpük oluşumu, uygun karıştırmanın sağlanması, sıcaklık veya çamur bekleme süresinin yükselmesiyle azalır [65]. Köpük giderme yöntemlerinden biri, besleme materyalinin köpüğün üzerinden verilerek köpüğün çökmesini sağlamaktır [66]. Köpük giderimi için farklı bir yöntemde, köpük engelleyen kimyasalların köpük üzerine püskürtülmesiyle köpük giderimi sağlanabilir [35,59]. Ayrıca, fermentör içerisine oluşan köpük miktarını algılayan sensörler eklenerek köpük oluşumu sürekli izlenip giderilebilir.

#### **4.4.7. Asitlik Ve Bazlık Derecesi (pH Değeri)**

“pH” hidrojen iyonlarının (H<sup>+</sup>) konsantrasyonunu gösteren, hidrojen iyon derişiminin on tabanına göre logaritmasının alınması ile elde edilen bir sayıdır [67]. pH değeri biyokimyasal süreçte en önemli parametrelerden biridir. Biyogaz üretiminde fermentör içerisindeki hammaddenin pH değeri 6-7 arasında olması istenir. pH değerinin çok düşük veya çok yüksek olması bakterilerinin etkinliğini ve gaz üretim verimini azaltırken biyogaz içeriğindeki CO<sub>2</sub> oranının artmasına sebep olur. Biyometan üretimi için pH değeri Çizelge 4.7’de verilmiştir [68].



Çizelge 4.7. Biyometan üretimi için pH değerleri.

pH değeri	pH değerindeki özelliği
7-7,2	En uygun
<6,2	Asit kısıtlama
>7,6	Amonyak kısıtlama

#### 4.4.8. Karbon Azot Oranı (C/N)

Organik materyaller, karbon ya da azot yönünden zengin olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Çim ve saman gibi organik materyaller karbon yönünden zenginken, insan ve tavuk atığı gibi organik materyaller azot yönünden zengindir. Azot, anaerobik bakterilerin gelişmesi için gerekirken, karbon ise, biyogazın oluşumu için gerekir. Azot karbona göre 25-30 kat daha az kullanılır [62]. Azot azaldığında anaerobik bakterilerin gelişimi azaldığı için verim azalır, azot fazla olduğunda pH değeri artarak amonyak birikimi oluşturur. Buda fermentör içerisinde zehirlenmeye sebep olur [62,69]. 1:15 ila 1:30 arasındaki C/N oranlar anaerobik fermentasyon için uygun olmaktadır [35]. Çizelge 4.8'de bazı materyallerin C/N oranları verilmiştir[35,62]. C/N oranını ayarlamak için kofermantasyon yönteminin kullanımı verim artımı sağlayabilir.

Çizelge 4.8. Sık kullanılan bazı materyallerin C/N oranları.

	<b>Materyal</b>	<b>C/N</b>
<b>Hayvansal Atıklar</b>	Sığır Atığı	6-20
	Manda Atığı	23
	Domuz Atığı	3-20
	Koyun Atığı	20-33
	At Atığı	24-25
	Tavuk Atığı	3-15
	Ördek Atığı	27
	Hayvan İdrarı	0,8-1
<b>Bitkisel Atıklar</b>	Mısır Sap ve Samanı	30-70
	Pirinç Artığı	50-78
	Mısır Koçanı	50
	Buğday Samanı	80>
	Yulaf Samanı	48-83
	Yer Fıstığı Kabuğu	31
	Yer Fıstığı Sapı	19-20
	Çim Artıkları	15-19
	Kuru Ot	10-27

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE METOT

#### 5.1. BİYOGAZ ÜRETİMİ

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında atıkların biyokimyasal olarak yakıtta dönüştüğü anaerobik fermantasyon yaygın olarak kullanılır. Anaerobik fermantasyon kolay bir teknik olup çevresel etkisi oldukça azdır ve enerji geri kazanım potansiyeli yüksektir[70–74].Biyogaz üretimi konusunda yapılan çalışmalarda, hammadde olarak genellikle sığır gübresi, kanatlı gübresi, domuz gübresi, buğday samanı, çavdar samanı, arpa samanı, mısır sapsarı ve artıkları, keten, çimen, sebze ve meyve atıkları, ziraat atıkları, dökülmüş ağaç yaprakları, algler, insan atığı, süt prosesi atıkları ve yemek atıkları kullanılmaktadır[5,35,75–77].Anaerobik fermantasyonda basit bir yaklaşım olan kofermantasyon farklı organik atıkların biyogaz verimini artırmak için farklı oranlarda karıştırılıp fermantasyona tabi tutma işlemidir. kofermantasyon yöntemi ile yüksekamonyak ve sülfür konsantrasyonların biyogaz üretimini engelleyen etkilerini azaltılabilir[78]. Daha iyi Karbon-Nitrojen dengesi sağlanarak anaerobik fermantasyonun stabilitesi iyileştirilebilir[79]. Tamponlanma kapasitesi artırılarak daha stabil biyogaz üretimi gerçekleştirilebilir[80].

##### 5.1.1. Kullanılan Maddeler Ve Hazırlanması

Tavuk gübresi kullanılarak anaerobik fermantasyonla biyogaz üretimi ve sadece tavuk gübresinin kullanımıyla oluşan inhibasyon etkisinin azaltılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır[81–84]. Bujoczek ve arkadaşları çalışmalarında inhibasyon etkisini azaltmak için tavuk gübresini sulandırarak toplam katı oranını azaltmışlardır [85].Demirci ve Demirerçalışmasında tavuk gübresinin inhibasyon etkisini azaltmak için kofermentasyon yöntemini denemişlerdir [82].

Sütten peynir üretiminde yan ürünhacimsel olarak % 85-90 oranda peynir altı suyundur [86]. Peynir altı suyu laktoz, protein, yağ ve mineralden oluşur. Peynir altı suyundan biyogaz üretimi kimyasal süreç istikrarsız olduğu için zordur[87]. Anaerobik koşullar altında peynir altı suyunun kullanımı fermantasyonda pH değerini bariz bir şekilde düşürerek metanojenik bakterilerin çalışmasını durdurur ve biyogaz üretimini azaltır[88]. pH seviyesinin kontrolünü sağlamak için birkaç teknik vardır bunlardan biri kofermantasyon yöntemidir[89], diğeri ise fermentörde sürekli pH ölçümü gerçekleştirip pH değer 6,9'un altına indiğinde bir besleme pompası yardımı ile fermentör içerisine 2,5 NaOH çözeltisi gönderilmesiyle seviyesi dengelenir[86].

Büyükbaş hayvan gübresinin nispeten düşük biyogaz üretim potansiyeli ve yüksek tamponlama özelliğine sahiptir[79].

Yapılan çalışmada, tavuk gübresinin inhibasyon etkisi, peyniraltı suyunun düşük pH değeri ve hızlı fermantasyonu ile büyükbaş hayvan gübresinin nispeten düşük biyogaz üretim potansiyeli gözetilerek bu maddelerin kofermantasyonu ile biyogaz üretimi gerçekleştirilmiştir.

### **5.1.2. Hammadde Hazırlanmasında Kullanılan Cihazlar**

Besleme materyalinin %8-13 arasında toplam katı oranına sahip olması, biyogaz üretimi için uygun olmaktadır[35,62,90]. Organik hammadde içeriğinin %12 olması için kullanılacak büyükbaş gübresi, tavuk gübresi, peynir altı suyu ve su yüzdelerinin belirlenmesi için Sartorius marka hassas terazi, DRY-line marka etüv fırını ve Nabertherm marka kül fırını kullanılmıştır.

Biyogaz üretiminde kullanılacak olan hammaddenin içeriğinde hacimsel olarak %12 katı madde oranını elde etmek için, içeriği %35 su, %17 peynir altı suyu, %40 büyükbaş hayvan gübresi ve %8 tavuk gübresinden oluşan organik materyal homojen olacak şekilde iyice karıştırılmıştır. Hazırlanan organik materyalin, darası alınan alüminyum numune kabı ile birlikte Şekil 5.1'de gösterilen Sartorius marka CPA2245 model hassas terazi de ağırlığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.1. Hassas terazi.

Önceden 105°C getirilmiş etüv fırınında organik materyal kurutulması için iki saat bekletilmiştir. Etüv fırınında kurutulduktan sonra organik materyal desikatörde soğutulur ve tartılmıştır. Toplam uçucu katı madde tayininin yapılması için ise 105°C sıcaklıkta elde edilen kalıntı Nabertherm marka kül fırınında 550°C’de 30 dakika yakılmıştır. Daha sonra desikatörde soğutulur ve tartılır. Şekil 5.2’de kül fırını ve etüv fırını gösterilmiştir. % katı madde içeriği Eş.5.1’ deki formülü ile hesaplanabilir.

$$\% \text{ katı madde içeriği} = 100 * (A-B)/C \quad (5.1)$$

Burada;

A : 105 °C sıcaklıkta elde edilen kalıntı ve alüminyum numune kabı ağırlığı (g),

B : Alüminyum numune kabı ağırlığı (g),

C : Hazırlanan numune ağırlığı (g)’dir.



a)Kül fırını



b) Etüv fırını

Şekil 5.2.Çalışmalarda kullanılankül ve etüv fırınları.

## 5.2. DENEY SİSTEMİ VE SİSTEM EKİPMANLARI

### 5.2.1. Biyogaz Üretimi Ve Saflaştırılmasında Kullanılan Sistemler

Biyogaz üretimi aşamasında, günlük yaklaşık 150 kg (kütleli olarak %35'i su, %17'si peyniraltı suyu, %40'ı büyük baş hayvan gübresi ve %8'i tavuk gübresi) subsurat ön depoda hazırlanmakta ve bir loblu pompa ile fermentere gönderilmektedir. Subsurat fermenterde 37°C sabit sıcaklıkta anaerobik fermentasyona tabi tutularak biyogaz üretimi gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi ana elemanlarının yer aldığı görüntü Şekil 5.3'te verilmiştir.



- |                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| 1 Ön depo      | 4 Elektrik pano odası          |
| 2 Fermentörler | 5 Biyogaz Motor Jeneratör Seti |
| 3 Son depo     | 6 Motor yüklemesi              |

Şekil 5.3. Deney sisteminin görünümü.

Üretilen biyogaz, öncelikle bir desülfirizasyon ünitesinden geçirilmiş, daha sonrasında ise bir yıkama kulesinde kireçli su ile istenilen CO<sub>2</sub> oranı elde edilene kadar yıkanarak, sırasıyla H<sub>2</sub>S ve CO<sub>2</sub> saflaştırılma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin sonunda biyogaz bir su ayırıcı üniteden geçirilerek çeşitli CH<sub>4</sub> (%51, %57 ve %87) konsantrasyonlarına sahip olması sağlanmış ve deneyler gaz deposunun

tamamen dolmasından sonra gerçekleştirilmiştir. Biyogaz kompozisyonu portatif biyogaz analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Çizelge 5.1’de deneylerde kullanılan cihazların teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan cihazların teknik özellikleri verilmiştir.

No.	Ölçüm cihazı	Ölçüm aralığı	Doğruluk
1	Hava kütle ölçer (Bosch HFM5)	8-370 kg/h	% < 3
2	Biyogaz sayacı (Meter Italia MG16)	0,16-25 m <sup>3</sup> /h	% < 1
3	Silindir içi basınç sensörü (Oprand Auto PSI-TC)	0-3000 psi	% ± 1
4	Enkoder (Kübler Sendix)	0-360°	0,1° CA
5	Basınç algılayıcısı (VPC)	0-1000 Pa	% < ± 1
6	Biyogaz akış ölçer (New-Flow TLF-09-A)	0-10 l / min	% ± 1
7	Yük hücresi (Esit SBS 1000)	1000 kg	≤ ± 0,05
8	Data kartı (Advantech USB 4716)	16-bit	± 1 LSB
9	Biyogaz analizörü (Geotech GA 2000)		
	CH <sub>4</sub>	% 0-100	% < 1
	CO <sub>2</sub>	% 0-100	% < 1
	O	% 0-25	% 0,3
	H <sub>2</sub> S	0-500ppm	% 0,80
10	Isıl çift (K type)	0-1200 °C	± 0,1 °C

### 5.2.1.1. Fermenterler Ve Hammadde Transfer Sistemi

Farklı materyallerin anaerobik fermantasyonun gerçekleştirilebilmesi için bir adet ön depo, iki adet fermenter ve son depo olmak üzere dört ana kazan paslanmaz çelik malzemedan üretilmiştir. Şekil 5.4’te, ön depo, frementör ve son depo gösterilmiştir. Biyogaz reaktörünün boyutlarının belirlenmesinde, çalışma sıcaklığı, buna bağlı olarak reaktörde kalış süresinin seçimi ve yükleme oranı büyük öneme sahiptir. Fermentör hacminin belirlenmesinde Eş.5.2’ deki formül kullanılmıştır.

$$V_f = V_{hammadde} \cdot BS + RB \quad (m^3) \quad (5.2)$$

Burada;

$V_f$  : Fermentör hacmi ( $m^3$ ),

$V_{hammadde}$  : Günlük Kullanılacak Hacimsel Atık Miktarı( $m^3/gün$ ),

BS : Bekletme Süresi (gün),

RB : Reaktör üzeri boşluk\* (m) x Reaktör çapı ( $m^2$ ).

\*Reaktör boyutlarının belirlenmesinde diğer bir faktör ise, reaktör üzerinde bırakılacak boşluğun tespit edilmesidir. Genel yaklaşım, sıvı seviyesinin üzerinde 0,5–2,0 m boşluk bırakılması şeklindedir. Bu şekilde bekletme süresindeki veya atık miktarındaki küçük değişimler karşılanabilir.



1 Ön depo      2 Fermentörler      3 Son depo      4 Hammadde transfer sistemi

Şekil 5.4.Sistem elemanlarının yerleşimi.

Hammadde fermentörde çürütülmesinden önce fermentör içerisine gönderilebilecek özelliklere sahip olmalıdır. Öncelikle, hammadde ne kadar küçük parçacıklara ayrılabilirse o kadar çabuk çürür, bu sebeple fermentör içerisine gönderilecek hammaddenin eğer gerekli ise kısılması (küçültülmesi) gerekmektedir. Katı madde oranı çok düşük olduğunda, materyal içerisindeki katının çökmesi söz konusudur. Bu oran çok yüksek olduğunda ise, gaz çıkışının engellenmesiyle karşılaşılır. Hammadde içeriğindeki katı madde oranının azaltılması hammaddenin pompalanmasını kolay ve mümkün kılmaktadır. Hammaddenin fermentör için





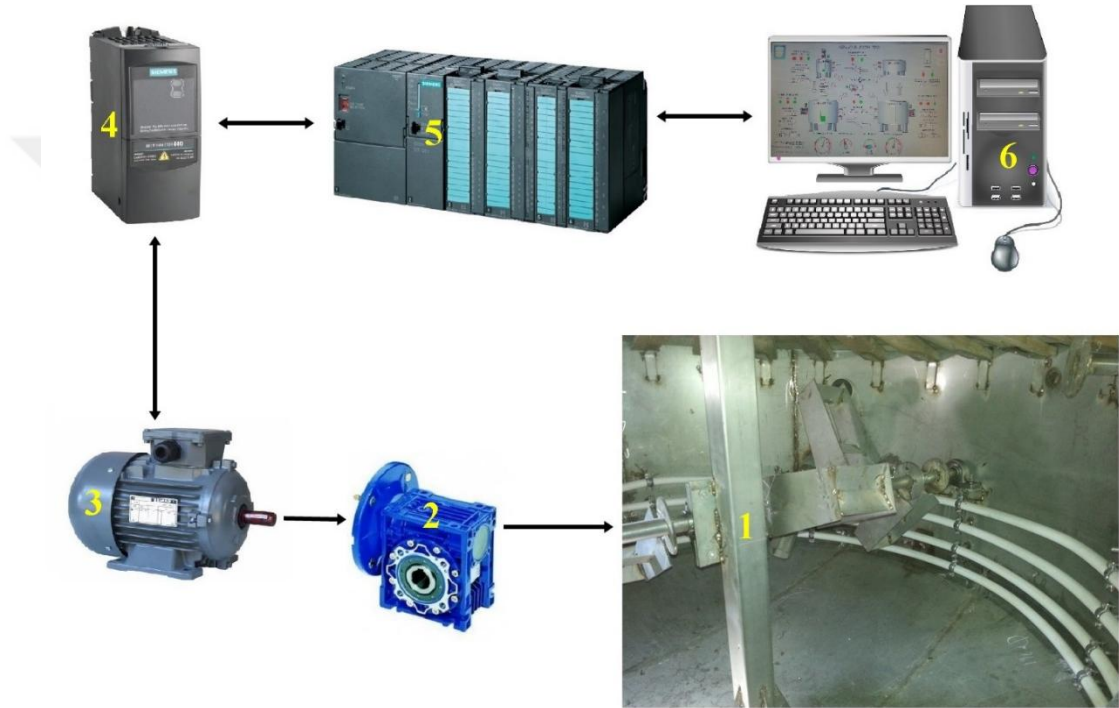
otomatik olarak kontrol edilmektedir. Şekilde sistemde kullanılan pnömatik ve manuel vanaların fotoğrafları verilmiştir. Hammadde transfer sisteminin çalışma mantığı aşağıdaki maddeler ile açıklanabilir.

- Ön depodan 1. fermentöre hammadde aktarımı: HEH V1 ve HBH V2 açık diğer vanalar kapalı.
- Ön depodan 2. fermentöre hammadde aktarımı malzeme iletimi: HEH V1 ve HBH V3 açık diğer vanalar kapalı.
- Ön depodan- son depoya hammadde aktarımı: HEH V1 ve HBH V4 açık diğer vanalar kapalı.
- 1. Fermentörden- ön depoya hammadde aktarımı: HEH V2 ve HBH V1 açık diğer vanalar kapalı.
- 1. Fermentörden-2. fermentöre hammadde aktarımı: HEH V2 ve HBH V3 açık diğerleri kapalı
- 1. Fermentörden- son depoya hammadde aktarımı: HEH V2 ve HBH V4 açık diğer vanalar kapalı.
- 2. Fermentörden- ön depoya hammadde aktarımı: HEH V3 ve HBH V1 açık diğerleri kapalı.
- 2. Fermentörden -1. fermentöre hammadde aktarımı: HEH V3 ve HBH V2 açık diğerleri kapalı.
- 2. Fermentörden - son depoya hammadde aktarımı: HEH V3 ve HBH V4 açık diğerleri kapalı.
- Son depodan-ön depoya hammadde aktarımı HEH V4 ve HBH V1 açık diğerleri kapalı.
- Son depodan- 1. fermentöre hammadde aktarımı HEH V4 ve HBH V2 açık diğerleri kapalı.
- Son depodan - 2. fermentöre hammadde aktarımı HEH V4 ve HBH V3 açık diğerleri kapalı.

#### **5.2.1.2. Karıştırma Sistemi**

Organik materyalin zaman içerisinde çökmesini engellemek ve biyogaz üretim miktarını artırmak için fermante edilen organik materyalin karıştırılması gereklidir.

Kurulan deney sistemi, karıştırma sisteminin biyogaz üretimine etkilerinin deinceleyebilmesi amacıyla karıştırma hızı ve süresi değişebilen bir sistem olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan karıştırma sistem karıştırıcı, redüktör, motor, motor sürücüsü, PLC ve otomasyon sisteminden oluşmakta ve şematik görüntüsü Şekil 5.6'da verilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde fermentasyon süreci boyunca fermenter her 10 dakikada bir 890d/d (1/60 redüksiyon ile) dönme hızı ve bir dakika süre ile karıştırılmıştır.



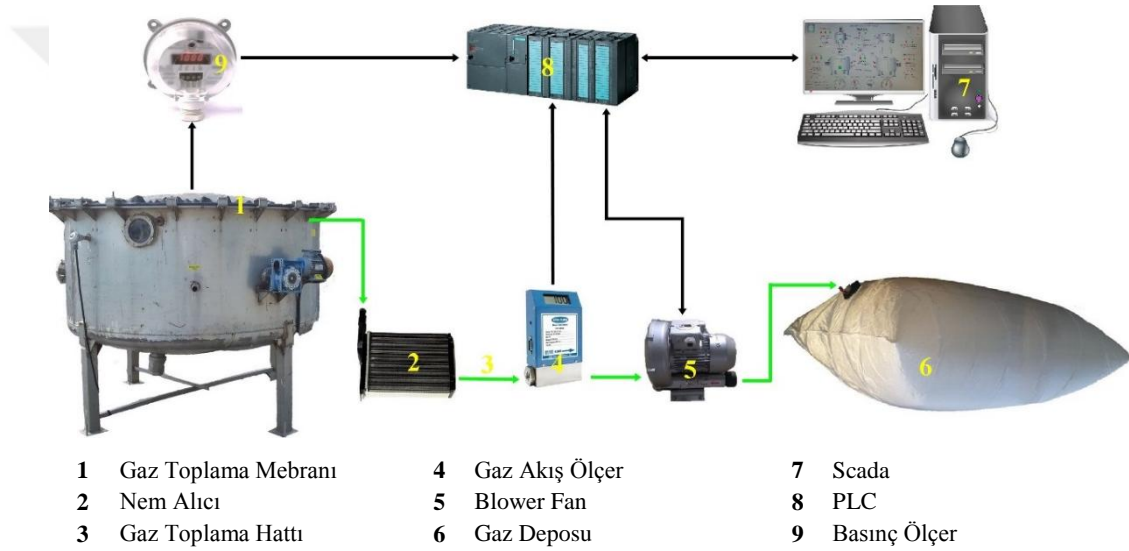
- |   |                 |   |                   |
|---|-----------------|---|-------------------|
| 1 | Karıştırıcı     | 4 | Motor Sürücüsü    |
| 2 | Redüktör        | 5 | PLC               |
| 3 | Elektrik Motoru | 6 | Otomasyon Sistemi |

Şekil 5.6.Fermentör içi hammadde karıştırma sistemi.

### 5.2.1.3. Gaz Toplama Ve Fermentör İçi Basınç Kontrol Sistemi

Biyogaz üretiminde fermentör içi basınç, gaz üretim verimi açısından oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Farklı hammaddeler için farklı fermentör içi basınç değerlerinin biyogaz üretim verimine etkisini incelemek için fermentör içi basıncı kontrol edebilen bir sistem kurulmuştur. Sistem membran içerisinde biriken biyogazı VPC marka basınç transmitteri yardımı ile ölçer ve ölçülen değer PLC vasıtası ile scada

programına gönderilir. Bu değer Scada programında operatörün girdiği basınç değeri ile karşılaştırılır ve eğer membran içi basınç değeri operatörün girdiği değerden büyükse, blower fana çalışma sinyali gönderilir. Basınç istenen değere geldiğinde blowerın çalışma sinyali kapatılır. Şekil 5.7’de Gaz toplama ve fermentör içi basınç kontrol sistemi gösterilmiştir. Blower fan çalışır durumda olduğunda, gaz toplama hattı üzerinden geçen biyogaz New-Flow TLF-09-A marka gaz akış ölçer vasıtası ile üretilen biyogaz miktarı anlık olarak ölçülmüştür. Fermentör içerisindeki sıcaklıkla birlikte üretilen biyogazın içerisine karışan su buharının akış ölçeri tıkamaması için sisteme ayrıca bir nem alıcı eleman eklenmiştir.



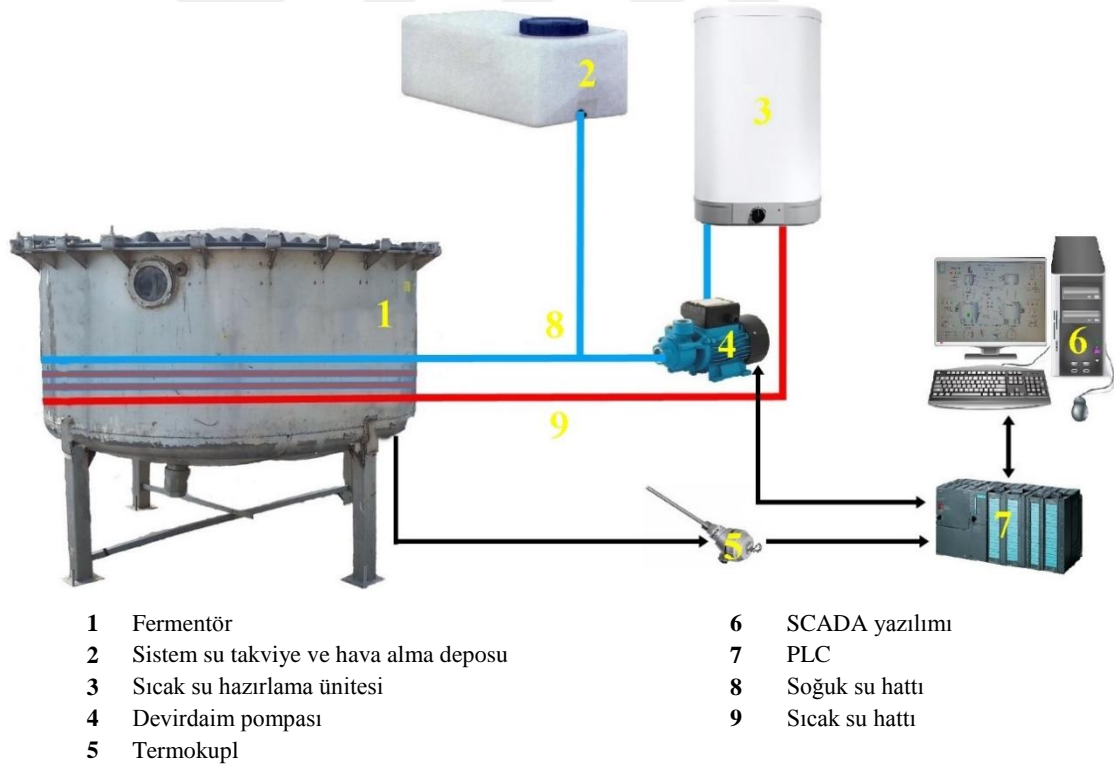
Şekil 5.7. Gaz toplama sistemi.

Fermentasyon süreci boyunca fermenter basıncı 200-300 mbar aralığında tutulmuş ve gaz basıncı 300mbar’ın üzerine çıktığında tek yönlü bir blower fan yardımı ile fermenter gaz basıncı 200 mbar olana kadar gaz deposuna gönderilmiştir.

#### 5.2.1.4. Isıtma Sistemi Ve Sıcaklık Takip Sistemi

Metan üreten bakterilerin sıcaklık tercihinine göre genellikle psikofilik, mezofilik, termofilik olmak üzere üç sıcaklık bölgesi tanımlanır. Sıcaklık değişimleri öyle önemlidir ki; örneğin termofilik sıcaklık bölgesinde  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}/\text{saat}$  üzerindeki sıcaklık değişimleri bile toksik etkiye neden olur ve metan üreten bakterilerin faaliyeti durabilir. Bu sebeple biyogaz üretim tesislerinde fermentör içi sıcaklığın hassas

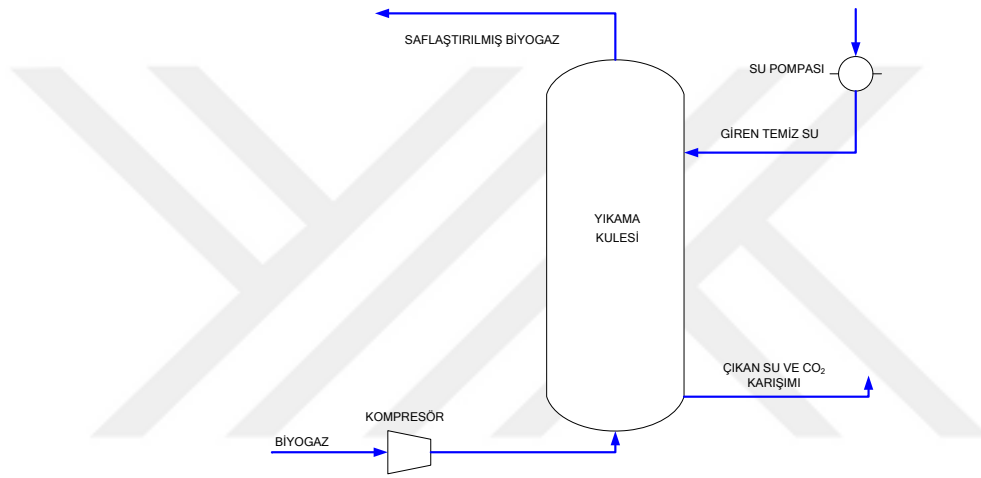
kontrolü büyük önem arz etmektedir. Fermentör içi sıcaklık sürekli takip edilmeli ve sıcaklık dalgalanmaları absorbe edilebilmelidir. Kurulan deney sisteminde sıcaklık takibi anlık olarak yapılmakta ve sıcaklık değişimlerine anlık müdahale edilmektedir. Sıcaklık takibi için K tipi ısılıçift, PLC ve Scada yazılımı, sıcaklık değişimlerine müdahale için sıcak su hazırlama ünitesi ve devir daim pompası kullanılmıştır. Şekil 5.8’ de ısıtma ve sıcaklık takip sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Sıcak su hazırlama ünitesinde ısıtılan su, sıcak su hattı vasıtası ile fermentör içerisinde dolaştırılarak hammaddenin 37°C’ye gelmesi sağlanmıştır. Sıcaklık değeri 37°C’nin altına düştüğünde devirdaim pompası çalışarak hammaddeyi ısıtır. Sıcaklık değeri 37°C’yi geçtiğinde devirdaim pompası devreden çıkarılarak ısıtma işlemi durdurulur ve fermentör içi sıcaklık istenilen değerde sabit tutulabilir. Isı kaybını minimum değere indirilebilmesi için fermentörler cam elyaf malzeme ile yalıtılmıştır. Ek açıklama A’dayalıtım sonrası termal kamera görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.8. Isıtma ve sıcaklık takip sistemi.

#### 5.2.1.5. Saflaştırma Sistemi

Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanılması için bazı saflaştırma işlemlerinin gerçekleştirilmesi gereklidir. Biyogazın içeriğinde yüksek oranda CO<sub>2</sub> bulunmaktadır ve yakıtın ısıl değerinin artırılması için yanmaya girmeyen gazların biyogaz içeriğinden arındırılması gerekmektedir. Bu sebeple biyogaz içeriğindeki CO<sub>2</sub> oranı ne kadar azaltılırsa ısıl değeri o kadar artar. Günümüze farklı CO<sub>2</sub> giderme yöntemleri bulunmakla birlikte yapılan çalışmada biyogaz yıkama kulesinde kireçli su ile yıkanarak CO<sub>2</sub> giderimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9'da CO<sub>2</sub> giderimi için yıkama kulesinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.9. CO<sub>2</sub> giderimi için yıkama kulesinin şematik görüntüsü.

Biyogaz içeriğindeki bulunan nem ve H<sub>2</sub>S motorda korozif etkiye neden olabilmektedir. Bu sebeple üretilen biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı öncesinde nem ve H<sub>2</sub>S giderimi gerekmektedir. Kurulan deney sisteminde nem ve H<sub>2</sub>S giderimi için Weifang Haitai marka nem alıcı ve H<sub>2</sub>S giderici kule kullanılmıştır. Nem alıcı sistem spiral ayırıcı yerçekimi yöntemi ile çalışmaktadır. H<sub>2</sub>S giderici kule ise, içeriğinde bulunan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.H<sub>2</sub>O peletlerin H<sub>2</sub>S'i absorbe etmesiyle biyogaz içeriğindeki H<sub>2</sub>S giderilmiştir.

#### 5.2.1.6. Fermantasyon Ve Kullanım Suyunun Yağmur Suyundan Temini

Biyogaz üretiminde fermentör tanklarında %50-90 oranında değişen miktarda su bulunur [6]. Bu gerçek göz önüne alındığında biyogaz üretim tesislerinde su tüketimi

oldukça fazladır. Ayrıca, fermertörde kullanılan suyun tamamının biyogaz üretiminde tekrar kullanımı sistemin kimyasal yapısını etkilediği için sistem oldukça fazla temiz suya ihtiyaç duyar. Günümüzde tatlı su kaynaklarının hızlı biçimde tüketilmesi ve kirlenmesi gibi sebeplerden ötürü su sıkıntısının etkilerinin giderek daha da hissedilmeye başlandığı son yıllarda, yağmur suyu gibi alternatif su kaynaklarının kullanımı tüm Dünya’da giderek daha da yaygınlaşmaktadır. Kurulan tesiste biyogaz üretimi için gerekli olan suyun tamamı yağmur suyundan karşılanmıştır. Yağmur suyu yaklaşık 200 m<sup>2</sup> olan biyogaz tesis çatısında toplanmış ve oluklar vasıtası ile 10 tonluk su deposunda depolanmıştır. Şekil 5.10’da yağmur suyu toplama sistemi gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Yağmur suyu toplama sistemi.

#### **5.2.1.7. SCADA Ve Otomasyon Sistemi**

SCADA terimi İngilizce “Supervisory Control and Data Acquisition” kelimelerinin ilk harflerinin okunması ile oluşturulan Türkçede “Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama Sistemi” olarak tanımlanan bir kısaltmadır. SCADA, kapsamlı ve entegre bir veri tabanlı kontrol ve izleme sistemidir. SCADA ile bir tesise veya işletmeye ait tüm ekipmanların kontrolünden üretim planlamasına, çevre kontrol







sisteminin şematik görüntüsü Şekil 5.12’de verilmiştir. Sistemde 2,5 Hp’lik hava kompresörü ve hava şartlandırıcısı kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Pnömatik vana kontrol sistemi.

## 5.2.2. Biyogaz Üretimi Ve Saflaştırılmasında Kullanılan Cihazlar

### 5.2.2.1. Yük Hücresi (Load Cell)

Kofermentasyon için farklı hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılabilmesi ve % 8-13 arasında katı madde oranına sahip olabilmesi için belirli oranlarda su ilavesi gereklidir. Bu amaçla, ön depo ayakları altına depo içerisine eklenen hammadde ve su ağırlıklarını hassas bir şekilde ölçen yük hücreleri yerleştirilmiştir. Direnç köprüsü mantığı ile çalışan yük hücreleri ön deponun ayakları altına 3 adet yerleştirilen yük hücreleri bir buata bağlanarak otomasyon sistemine anlık olarak ön depo ağırlık bilgisini göndermektedir. Yük hücrelerine ait görüntü Şekil 5.13’te, teknik özellikleri ise Ek açıklama C’de verilmiştir.



Şekil 5.13. Yük Hücresi (Load cell).

### 5.2.2.2. Sistemde Kullanılan Elektrik Motorları

Kurulumu yapılan biyogaz sisteminde su devir daimini sağlamak için 0,25 kW gücünde iki adet, hammaddenin karıştırılması amacıyla ön depo, 1. ve 2.fermentörlerde 0,55 kW gücünde birer adet olmak üzere toplam üç adet, hammaddenin transferinde kullanılan loblu pompanın hareketini sağlamak üzere 1,1 kW gücünde olmak üzere toplamda 6 adet elektrik motoru kullanılmıştır.

### 5.2.2.3. Seviye Kontrol Cihazları

Ön depo, 1. ve 2. fermentör içerisindeki hammadde miktarını ölçmek için, Autrol marka seviye sensörü kullanılmıştır. Seviye sensörü (Elektronik fark basınç transmitteri) ön depo ve fermentörler içerisindeki sıvı seviyesini basınç fark bilgisinden hesaplayarak anlık olarak otomasyon sistemine gönderir. Şekil 5.14'de elektronik fark basınç transmitterin görüntüsü, Ek açıklama Ç'de ise teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.14. Elektronik fark basınç transmitteri.

#### 5.2.2.4. Basınç Algılayıcı

Fermentör basıncının takibi, fermentör içerisi farklı basınçların set edilebilmesi için fermentör iç basınç ile atmosfer arasındaki basıncı arasındaki farkı ölçüp otomasyona bu bilgiyi gönderen VCP marka hava fark basınç transmitteri kullanılmıştır. Kullanılan hava fark basınç transmitteri 0-500 Pa arasındaki basınç değerlerini ölçebilmektedir. Şekil 5.15’de hava fark basınç transmitteri gösterilmiştir. Fark basınç transmitterinin teknik özellikleri ise Ek açıklama D’de verilmiştir.



Şekil 5.15. Fark basınç transmitteri.

#### 5.2.2.5. Isılçiftler

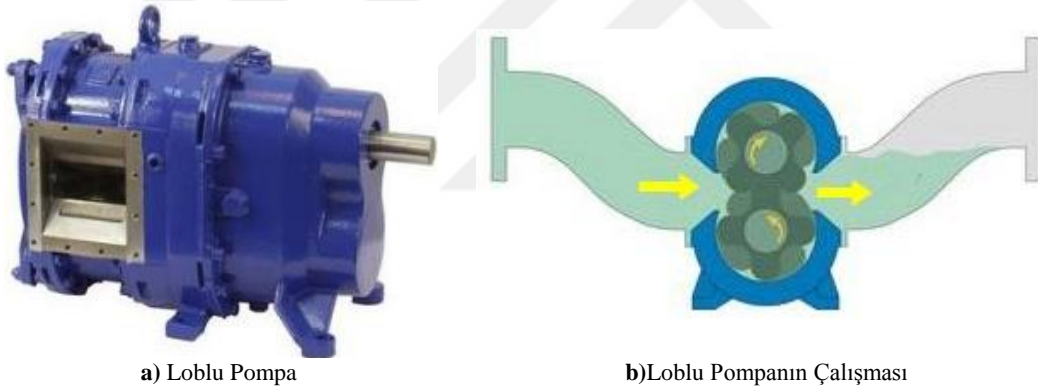
Fermentör içi sıcaklığın tespitinde ve sabit sıcaklık kontrolünün sağlanmasında  $\pm 0,1$  °C hassasiyete sahip olan K tipi ısılıçiftler kullanılmıştır. Isıl çiftlere bağlanan bir transmitter vasıtası ile sıcaklık bilgisi PLC’ye aktarılmış ve hem sıcaklık bilgisinin kaydı hem de kontrolü sağlanmıştır. Şekil 5.16’ta K tipi ısılıçift gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Kafalı K tipi ısılcıft.

#### 5.2.2.6. Loblu Pompa

Fermentörler arasındaki hammadde alışverişinde kilit eleman loblu pompadır. Loblu pompa %12 katı madde içeriğine sahip hammaddenin fermentörler arası transferini sağlar. Sistemde Vogelsang marka loblu pompa kullanılmıştır. Loblu pompa Katı parça ve partikül ihtiva eden sıvıların transferinde sorunsuz şekilde çalışabildiği için seçilmiştir. Loblu Pompa; birbirine ters yönde dönen 2 ayrı shaftın üzerine sabitlenmiş ve iç içe geçmiş 2 rotordan oluşur. Bu rotolara lob adı verilir. Sistemde kullanılan loblar birbirine paralel ve iki kanattan oluşmuştur. Sistemde kullanılan loblu pompa 2,5 cm'lik katı parçaların geçmesine izin verecek yapıya sahiptir. Şekil 5.17'de loblu pompaya ait fotoğraf verilmiştir.



Şekil 5.17. Loblu pompa.

#### 5.2.2.7. Redüktörler

Karıştırıcı ve pompa sisteminde devrin azaltılıp gücün artırılması için redüktör kullanılmıştır. Loblu Pompa tahrikini Şekil 5.18'de görüldüğü gibi i-mak marka redüktörden almaktadır. Pompa motorundan gelen devir 1600 olduğunda pompa redüksiyonunda bu devir 140 devre kadar düşer. Hammadde karıştırıcılarında Universal marka 1/60 oranlı vidalı tip redüktör kullanılmıştır.



a) Karıştırıcı redüktörü



b) Pompa redüktörü

Şekil 5.18. Sistemde kullanılan redüktörler.

### 5.2.2.8. Blower Fan

Basıncın sabitlenebilmesi, fermentördeki biyogazın depoya ve depodaki biyogazın jeneratör setine gönderilmesinde blower fan görev almıştır. 0,25 kW lık güce sahip olan blower fanın emme ve basma hatlarının değişebilmesi için PVC borudan vana sistemi kurulmuştur. Şekil 5.19’da Blower fan gösterilmiştir.



A) Blower yardımı ile fermentörden depoya biyogaz gönderimi



B) Blower yardımı ile depodan jeneratöre biyogaz gönderimi

Şekil 5.19. Blower fan.

### 5.2.2.9. Sürücüler

Kurulan deneysel sistemde farklı hızlarda besleme sürelerinin sistem ve biyogaz üzerindeki etkilerini incelemek için pompa motorunun kontrolü Siemens Micromaster 440 motor sürücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Motor sürücüsü vasıtası ile

pompa devri ayarlanarak hammadde pompalama miktarları değiştirilebilir. Motor s¼r¼c¼leri elektrik tasarrufu sağlamasının yanında herhangi bir elektriksel bağlantıya dokunmadan motorun ters y¼nde çalışmasını da sağlayabilir. Pompa s¼r¼c¼ye, s¼r¼c¼ ise PLC sistemi ¼zerinden otomasyon yazılımına bağlıdır. Bu şekilde bilgisayar ¼zerinden pompanın kontrol¼ ve hızı ayarlanabilir. Siemens Micromaster 440 motor s¼r¼c¼s¼n fotoğrafları şekil 5.20’de, teknik ¼zellikleri ise, Ek açıklama E’de verilmiştir.



şekil 5.20. Siemens Micromaster 440 motor s¼r¼c¼s¼.

#### 5.2.2.10. Programlanabilir Mantıksal Denetleyici (PLC)

Merkezi işlem birimi, bellek birimi, giriş ve çıkış biriminden oluşan PLC, ¼retim sistemlerinden birçok makinelerin kontrol¼ gibi çok geniş bir yelpazede cihazların denetiminde kullanılan, algılayıcılardan aldığı bilgiyi, kendine verilen programa g¼re işleyen ve iş elemanlarına aktaran bir mikroişlemci tabanlı birotomasyon cihazıdır. Programmable Logic Controller (PLC) normal bilgisayarların aksine elektriksel g¼r¼lt¼lere, sıcaklık farklarına, mekanik darbelere karşı dayanıklı tasarlanmış ve birçok giriş ve çıkış biriminesahiptir. Kurulan sistemde Simens S7 300 marka PLC kullanılmıştır.

#### 5.2.2.11. Gaz Akış ¼ler

Ferment¼rlerde ¼retilen g¼nl¼k ve toplam biyogaz miktarını belirlemek için şekil 5.21’de g¼sterilen New-Flow marka TLF-09-A model akış ¼ler sisteme monte



edilmiştir. Bu akış ölçerinin ölçüm aralığı ise, 0-10 lt/dk olup diğer teknik özellikleri Ek açıklama F’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Gaz akış ölçer.

#### 5.2.2.12. Biyogaz Analizörü

Üretilen ve tüketilen biyogazın içeriğinin belirlenmesinde Geotech marka GA 2000 model portatif biyogaz analiz cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.22’de gösterilen GA 2000 gaz analizörü, biyogazın içeriğinde bulunan CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve CO gazlarının miktarlarını hassas bir şekilde tespit edebilen, çevre ile ilgili tüm mevzuatları destekleyen ve kolay kalibre edilebilir bir cihazdır. Şekil 5.22’de gaz analizörüne ait görüntü Ek açıklama G’de ise cihaza ait kalibrasyon sertifikası yer almaktadır.



Şekil 5.22. Biyogaz analizörü.

#### 5.2.2.13. Vanalar

Biyogaz üretim sisteminde hammaddenin fermentörler arasında aktarımının yönlendirilmesinde pnömatik aktüatörlü bıçaklı vana, bıçaklı sürgülü vana ve wafer

tip kelebek vana olmak üzere üç tip vana kullanılmıştır. Vanaların biyogaz üretim sistemi üzerindeki görüntüleri Şekil 5.23'te verilmiştir.



A)Pnömatik Aktüatörlü Bıçaklı Vana B) Bıçaklı sürgülü vana C)Wafer tip kelebek vana

Şekil 5.23. Vanaların sistemdeki yerleri.

### 5.2.3. Biyogaz Tüketiminde Kullanılan Cihazlar

Üretilen M51, M57, M87 yakıtlarını buji ateşlemeli bir motorda denenmesi amacıyla motor-jeneratör set tüm ölçüm cihaz ve ekipmanları ile deneysel sistem olarak kurulmuştur. Çalışmalar, dizel motora buji ilavesi ile modifiye edilmiş ve üzerinde akuple jeneratör sistemi bulunan biyogaz jeneratöründe gerçekleştirilmiştir. Saflaştırma ünitelerinden geçirilerek saflaştırılan biyogaz, bir gaz sayacından geçirilmiş ve motor tarafından tüketilen gazın debisi tespit edilmiştir. Motor tarafından tüketilen havanın debisi Bosch marka HFM5 model hava kütle ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 5.24'de Biyogaz tüketiminde kullanılan deney sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir.





Şekil 5.24.Deney sisteminin şematik görüntüsü.

Çalışmalarda kullanılan buji ateşlemeli motor-jeneratör setinin teknik özellikleri Ek açıklama Ğ'de verilmiştir. Kullanılan motor, 4 silindirli, 4 zamanlı, 11:1 sıkıştırma oranına sahip ve su soğutmalı ve jeneratör kontrol ünitesinin otomatik olarak hava yakıt oranını ayarlaması ile 1500 rpm sabit devirde 10 kW çıkış gücünde çalışmaktadır. Çalışmalarda, jeneratör 1,5- 3- 4,5-6- 7,5 ve 9 kW yük ile yüklenmiş ve çeşitli yüklerdeki performans parametreleri, egzoz gazı sıcaklığı, çeşitli emisyon değerleri, silindir içi basınç ve ısı yayma oranı gibi yanma parametreleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

### 5.2.3.1.Data Logger

Encoder, silindir içi basınç sensörü ve hava kütle ölçerden gelen bilgilerin kaydedilmesinde 16 analog girişe ve 16 bit çözünürlüğe sahip Advantech marka UBS-4716 model data kartı kullanılmıştır. UBS-4716 model data kartının teknik özellikleri Ek açıklama H'de verilmiştir.

### 5.2.3.2. Egzoz Emisyon Analizörü

HC, CO ve NO<sub>x</sub> egzoz emisyon değerleri Italo Plus marka, spin model egzoz gaz analiz cihazı ile ölçülmüştür. Egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2.Egzoz emisyon analizörü özellikleri.

Ölçüm cihazı	Ölçüm aralığı	Doğruluk
Egzoz Emisyon Analizörü		
CO	0-15 %	0,01%
HC	0-20000 ppm	0,01%
NO <sub>x</sub>	0-4000 ppm	1%

### 5.2.3.3. Hava Kütle Ölçer

Yanma için gerekli olan havanın debisi, hava fitresi ve emme manifoldu arasına yerleştirilen Bosch marka, HFM5 model 0 280 217 123 part numaralı hava kütle ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Ek açıklama I'da verilen hava akış-çıkış voltaj grafiği kullanılarak gerekli olan hava debisinin ölçümü sağlanmıştır. Şekil 5.25'de hava kütle ölçere ait görüntü verilmiştir.



Şekil 5.25. Hava kütle ölçer.

### 5.2.3.4. Silindir İçi Basınç Sensörü Ve Encoder

Silindir içerisinde pistonun konumu tespit etmek ve o konumdaki silindir içi basıncın değerini bulmak amacıyla Oprand marka bujili basınç sensörü ve kübler marka

encoder kullanılmıştır. Encoder krank miline bir aparat ile aynı ekseninde olacak şekilde bağlanmıştır. Encoder her turda 360 adet veriyi veri alışı veri kartına gönderebilecek özelliğe sahiptir. Basınç sensörü birinci silindirde bujinin yerine takılmış olup, hem basınç sensörü hem de buji görevi görmektedir ve 0-200 bar aralığında ölçüm yapabilmektedir. Encoder ve basınç sensörüne ait görüntü Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



a) Encoder



b) Basınç sensörü

Şekil 5.26. Encoder ve silindir içi basınç sensörü.

### 5.2.3.5. Biyogaz Sayacı

Saflaştırma ünitelerinden geçirilen biyogaz körüklü tip Meter italia marka, MG16 model gaz sayacından geçirilerek motor tarafından tüketilen gaz debisi tespit edilmiştir. Gaz sayacı 0-25 m<sup>3</sup>/h ölçüm aralığı için uygundur ve <math>< \%1</math> doğruluk değeri ile kullanılan biyogaz miktarını tespit edilebilecek özelliktedir. Gaz sayacı çalıştığında dijital kronometre çalıştırılarak debi hesabı yapılmıştır. Şekil 5.27'de gaz sayacının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.27. Gaz sayacı.

### 5.2.3.6. Gürültü Emisyon Ölçümleri

Biyogaz motorunda gerçek çalışma koşulları altında gürültü seviyelerinin ölçümü amacıyla, Svantek 104 model bir gürültü ölçüm cihazı (dozimetre) kullanılmıştır. Kullanılan cihaz, ISO 362-1:2007 standardına uygun deney prosedürü doğrultusunda motor bloğundan 1 m uzaklığa yerleştirilmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Gürültü ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir[79].

Çizelge 5.3. Gürültü ölçüm cihazına ait teknik özellikler.

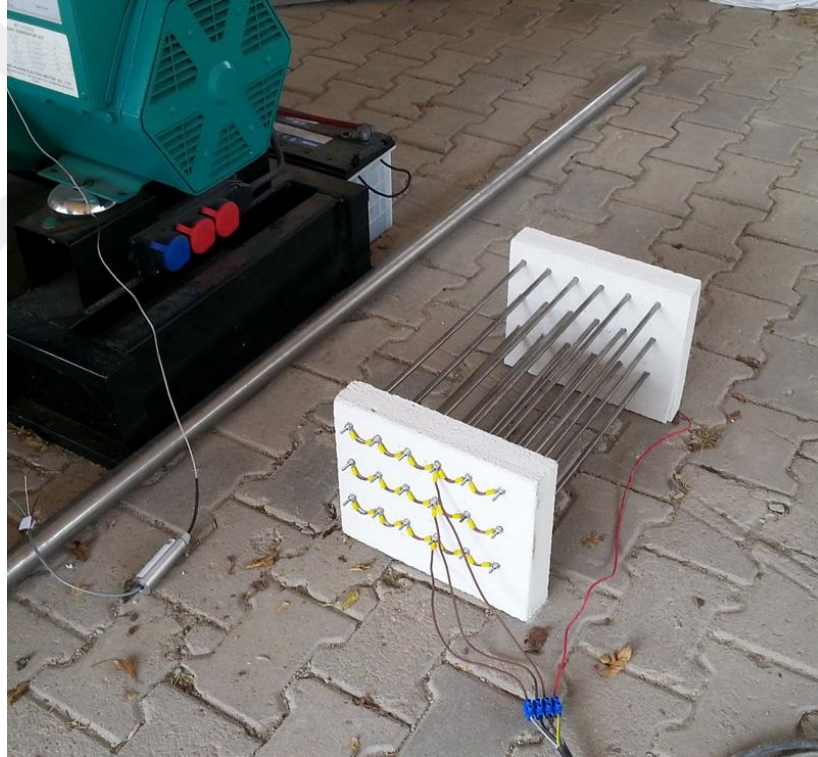
Model	Svantek SV 104
Ağırlıklandırma Filtresi	A, C ve Z
Zaman Sabitleri	Yavaş ve hızlı etki
Ölçüm Aralığı	55 dBA RMS ÷ 140,1 dBA
Frekans Aralığı	30 Hz ÷ 8 kHz
Dinamik Aralık	95 dB

### 5.3. DENEY VERİLERİ İLE HESAPLANAN PERFORMANS DEĞERLERİ

Motor-jeneratör setinde, çeşitli CH<sub>4</sub> oranlarında üretilen biyogazın kullanımında motor performansını analiz edebilmek amacıyla, sistem üzerine yerleştirilensensörlerden alınan veriler kullanılarak; efektif güç, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, hava yakıt oranı, volumetrik verim, termik verim, silindir basıncı, motor ısı dağılımlarının uygun teorik yöntemlerle hesaplanması gerekmektedir. Motor-jeneratör setinde yapılan deneyler neticesinde tespit edilen veriler ve hesaplanan bulgular biyogaz içeriğindeki CH<sub>4</sub> oranının sistem özelliklerine etkilerinin anlaşılabilmesi ve ortaya çıkan etkilerin değerlendirilebilmesi açısından oldukça önemli çıktılar sunmaktadır.

#### 5.3.1. Motor Moment Değerinin Tespiti

Elektromekanik dinamometre, proni freni, hidrolik dinamometre, jeneratör veya şasi dinamometresi gibi cihazlar ile ölçülen motor momenti (tork), krank miline uygulanan kuvvet momenti olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmada, sistemde kullanılan motoru yüklemek amacıyla bir elektrik jeneratörü, fren olarak kullanılmıştır. Motor tarafından çalıştırılan jeneratöre rezistans bağlanarak, jeneratörün verdiği elektrik enerjisi rezistanslar üzerinde ısı enerjisine dönüştürülmüş ve motor bu şekilde yük altında test edilmiştir. 6 adet 1,5 kW gücüne sahip rezistans grubu birbirlerine paralel olacak şekilde bağlanarak, 0-9 kW arasında yükleme grubu oluşturulmuştur. Rezistans grupları, birbirlerine bağlama şekline göre 1,5- 3- 4,5- 6- 7,5 ve 9 kW aralığında bir yük değeri alabilmekte olup, kullanılan rezistans grubu Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Rezistans grubu.

Jeneratörün, 1,5- 3- 4,5- 6- 7,5 ve 9 kW aralığındaki yük değerleri ile yüklenmesiyle, jeneratör kutupları arasında ölçülen akım şiddeti (I) ve gerilim değeri (U) ile jeneratörün verimiyle birlikte efektif güç Eş.5.3’deki formül ile hesaplanabilir.

$$P_b = \frac{U.I}{\eta_j . 1000} \quad (5.3)$$

Burada;

$P_b$  : Efektif güç (kW),

$U.I$  :Jeneratöre bağlanan rezistans gücü (Watt),

$\eta_j$  :Jeneratörün verimi(%).

### 5.3.2. Özgül Yakıt Tüketimi

Motor karakteristiğini belirleyen en önemli parametrelerden biri olan özgül yakıt tüketimi, birim miktarda güç elde etmek amacıyla harcanan yakıt miktarı olarak tanımlanır ve Eş.5.4 kullanılarak tespit edilir [25].

$$b_e = \frac{\dot{m}_y}{P_b} \quad (5.4)$$

Burada;

$b_e$  : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh),

$\dot{m}_y$  : Yakıt tüketimi (g/h),

$P_b$  : Efektif güç (kW), olarak verilebilir.

### 5.3.3. Hava-Yakıt Oranı

Hava-yakıt oranı, bir çevrim boyunca silindire alınan hava kütlelerinin silindire alınan yakıt kütlelerine oranı olarak ifade edilir.Hava-yakıt oranı, egzoz emisyonlarından motor verimlerine kadar birçok parametrede önemli rol oynar.

$$HYO = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_y} \quad (5.5)$$

Burada;

$HYO$  : Hava-yakıt oranı,

$\dot{m}_h$  : Kütleli hava debisi (g/s),

$\dot{m}_y$  : Kütlesel yakıt debisi (g/s).

#### 5.3.4. Volumetrik Verim

Volumetrik verim, motorun herhangi bir devrindeki tükettiği gerçek hava hacminin pistonun silindirde boşalttığı hacme oranı olarak tanımlanır. Bu tanıma göre volumetrik verim Eş. 5.6, daha ayrıntılı ifade ile de, Eş.5.7 ile ifade edilebilir.

$$\eta_V = \frac{V_h}{V_s} \quad (5.6)$$

$$\eta_h = \frac{n_R \dot{m}_h}{\rho_{hava} N/60} \quad (5.7)$$

Burada;

$n_R$  : İki zamanlı motorlar için 1, dört zamanlı motorlar için 2 alınır,

$\eta_V$  : Volumetrik verim,

$V_h$  : Tüketilen gerçek hava hacmi ( $m^3$ ),

$V_h$  : Pistonun silindirde boşalttığı hacim ( $m^3$ ),

$\dot{m}_h$  : Havanın kütleli debisi (kg/s),

$\rho_{hava}$  : Havanın yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),

$N$  : Motor devri, olarak ifade edilir.

#### 5.3.5. Fren Termik Verimi

Yakıtın yanması sonucunda oluşan ısı enerjisine karşılık, motorun bu enerjiyi faydalı işe dönüştürme oranına fren termik verimi denir. Yanma sonucu oluşan ısının bir kısmı soğutma ve yağlama sistemi ile yanmış egzoz gazları tarafından motordan uzaklaştırıldığı için, sadece geriye kalan ısı motorlarda güce dönüşebilir. Motor fren termik verimi Eş. 5.8'deki ifade ile tespit edilebilir.

$$\eta_t = \frac{P_b}{H_u \dot{m}_y} \quad (5.8)$$

Burada;

$\eta_t$  :Termik verim,

$H_u$  :Kullanılan yakıtın alt ısıl değeri (kJ/kg), şeklinde ifade edilebilir.

### 5.3.6. Sıcaklık Ölçümü

Motor performans testleri sırasında egzoz gazı, motor yağı sıcaklığı ve ortam sıcaklıklarının ölçümleri K tipi ısılıçift ile gerçekleştirilmiştir. Motor deneylerine motor yağ sıcaklığı 50°C'ye geldiğinde (motor kararlı halde iken) başlanmıştır.

### 5.3.7. Silindir Basıncının Mutlak Basınca Dönüştürülmesi

Silindir içi basınç sensörü, üzerine etki eden kuvvetle orantılı olarak mV cinsinden bir çıkış sinyali üretmektedir. Herhangi bir krank açısında elde edilen sinyalden yararlanılarak mutlak basınç;

$$P_{\theta} = C * E_{\theta} * (1/14,5) \quad (5.9)$$

eşitliği ile bulunur. Burada;

$P_{\theta}$  : Herhangi bir krank açısında elde edilen basınç (bar),

$C$  : Silindir basıncı ile sinyal çıkış voltajı arasındaki oranı belirleyen bir katsayı,

$E_{\theta}$  : Herhangi bir krank açısında elde edilen çıkış sinyalidir.

### 5.3.8. Isı Dağılımı Analizi Ve Filtreleme

Silindir içi basınç sensörü ve enkoderi kullanarak elde edilen veriler ve Termodinamiğin I. Kanununun yanma odasına uygulanması ile yakıtın kimyasal enerjisinin hangi oranda ortaya çıktığı (ısı dağılımı) belirlenebilir. Elde edilen ısı dağılımı, motor çalışma şartlarının performans üzerindeki etkisi, motor



performansive aynı şartlarda farklı motorların performanslarının değerlendirilmesinde kullanılabilir[92]. Isı dağılımı hesabı yapılırken, dengede olmayan şartlar, ani basınç ve sıcaklık değişimleri, yakıtın buharlaşması gibi durumlar ihmal edilmiş, silindir içi dolgunun termodinamik ve kimyasal olarak dengede olduğu varsayılmıştır.

Termodinamiğin I. Kanunundan,

$$\frac{du}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (5.10)$$

$$mC_v \frac{dT}{dt} = \dot{Q} - P \frac{dV}{dt} \quad (5.11)$$

Denklem ideal gaz kabul edilirse,

$$PV = mRT \quad (5.12)$$

Kütle sabit zamana göre türev alındığında;

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mR} \left[ P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \right] \quad (5.13)$$

Eşitlik 4.11 ve Eşitlik 4.12'deki ifadeler birleştirilirse,

$$\dot{Q} = \left[ \frac{C_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{dt} + \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (5.14)$$

ifadesi şeklini alır.

$\frac{C_v}{R}$  ve  $k$ , özgül ısı cinsinden ifade edildiğinde;

$$\frac{C_v}{R} = \frac{1}{k-1} \quad (5.15)$$

İfadede zaman yerine krank açısı ( $\theta$ ) alınırsa Eşitlik 4.15 elde edilmiş olur.

$$\dot{Q} = \left[ \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{k}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \right] \quad (5.16)$$

Monyem (1998) çalışmasında Eş. 5.16'daki ifade de iki veya üç noktanın birinci türevini almış fakat ısı dağılımı grafiğini olumsuz etkileyen ani dalgalanmaların oluşumunu engelleyememiştir. Monyem daha sonra, merkez noktanın iki gerisi ve iki ilerisindeki değerlerin türevini almış ve dalgalanmaları minimize ederek istediği sonuçları bu şekilde ulaştırmıştır[93]. Yapılan çalışmada, Eş. 5.17'de gösterildiği gibi merkez noktanın iki gerisi ve iki ilerisindeki değerlerin türevi alınarak titreşim minimize edilmeye çalışılmıştır.

$$\left( \frac{du}{dx} \right)_i = \frac{(-u_{i+2} + 8u_{i+1} - 8u_{i-1} + u_{i-2})}{(12 \cdot \Delta\theta)} \quad (5.17)$$

Burada;

$i$  :  $i$  noktasındaki krank açısı,

$u_i$  :  $i$  krank açısındaki basınç,

$\Delta\theta$  :  $i$  ve  $i+1$  arasındaki krank açısıdır.

Dijital filtreleme adı verilen bir teknik ile ısı dağılım grafiğindeki ani dalgalanmaları bir miktar daha azaltılabilir. Dijital filtreleme amacıyla yapılan çalışmada Eş.5.18 ve Eş. 5.19'deki ifadeler kullanılmıştır.

$$d_i=(m_{i-1}+m_{i+1})/2 \quad (5.18)$$

$$s_i=(d_{i+1}+d_i+d_{i-1})/3 \quad (5.19)$$

Burada;

$m_i$  : Orijinal veri,

$d_i$  : Ara değer,

$s_i$  : Filtrelenmiş veridir.

### 5.3.9.Biyogazın Bağlı Yoğunluğunun Tespiti

Üretilen farklı  $CH_4$  konsantrasyonuna sahip biyogazın bağlı yoğunluğun hesaplanması Eş.5.20'deki formül kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Bağlı Yoğunluk} = \frac{A \cdot A_1 + B \cdot B_1}{C} \quad (5.20)$$

Burada;

$A$  :  $CH_4$  Molekül ağırlığı (g/mol),

$A_1$  : %  $CH_4$  oranı,

$B$  :  $CO_2$  molekül ağırlığı (g/mol),

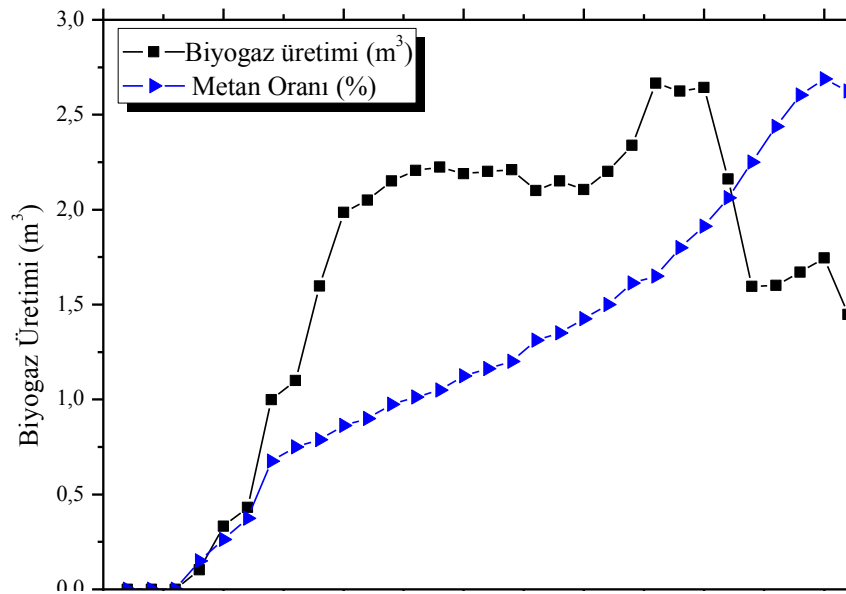
$B_1$  : %  $CO_2$  oranı,

$C$  : Havanın Molekül ağırlığı (g/mol), ifade etmektedir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmanın ilk aşamasında, pilot ölçekli kurulan bir biyogaz sisteminde, kofermantasyon yöntemi ile sürekli beslemeli olarak üretilen biyogazın bir aylık süreç boyunca içeriğindeki CH<sub>4</sub> oranı ve günlük üretilen biyogaz miktarındaki değişim Şekil 6.1’de verilmiştir. Biyogaz üretiminin başlanmasından itibaren ilk 10 günün sonunda biyogaz üretimi ortalama 1,6 m<sup>3</sup>/gün seviyesine ulaşmış ve devam eden süreçte biyogaz üretim miktarı değişkenlik göstermiştir. Zamana bağlı olarak üretilen biyogazın CH<sub>4</sub> içeriği %71’e kadar artış göstermiş ve üretilen gaz, 50m<sup>3</sup> oluncaya kadar bir gaz deposunda biriktirilmiştir. Üretilen biyogaz, saflaştırma işlemlerine tabi tutularak hedeflenen özelliklere sahip olması ve deneylerde kullanılabilir hale getirilmesi sağlanmıştır. Çeşitli CH<sub>4</sub> konsantrasyonlarında üretilen biyogazın tespit edilen özellikleri ile bilinen yakıt türlerinin özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir[10,94–96].

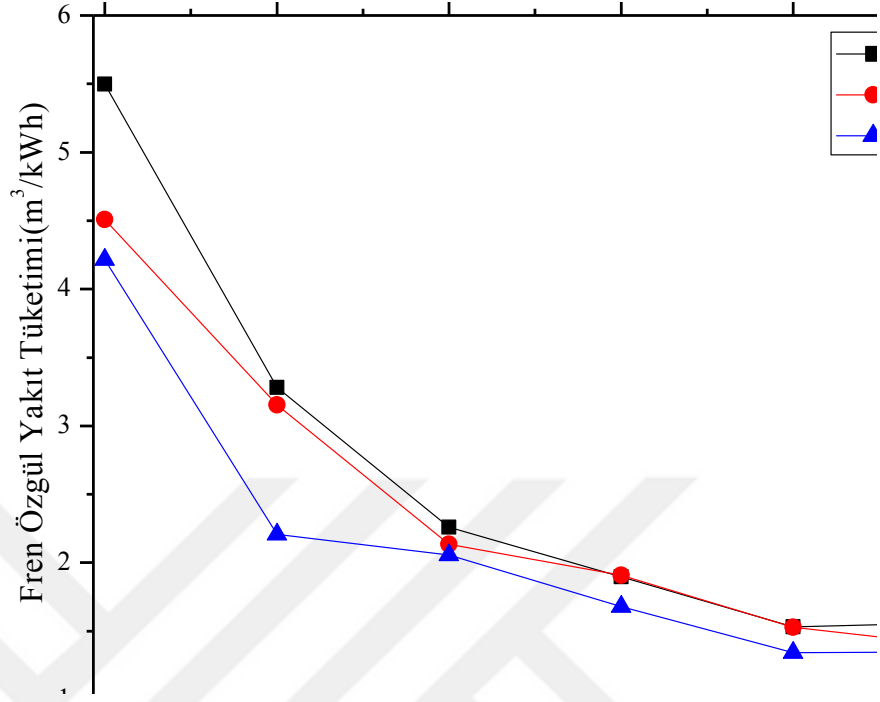


Şekil 6.1. %CH<sub>4</sub> oranı ve Biyogaz üretim miktarının zamana göre değişimi.

Çizelge 6.1. Yakıt özellikleri.

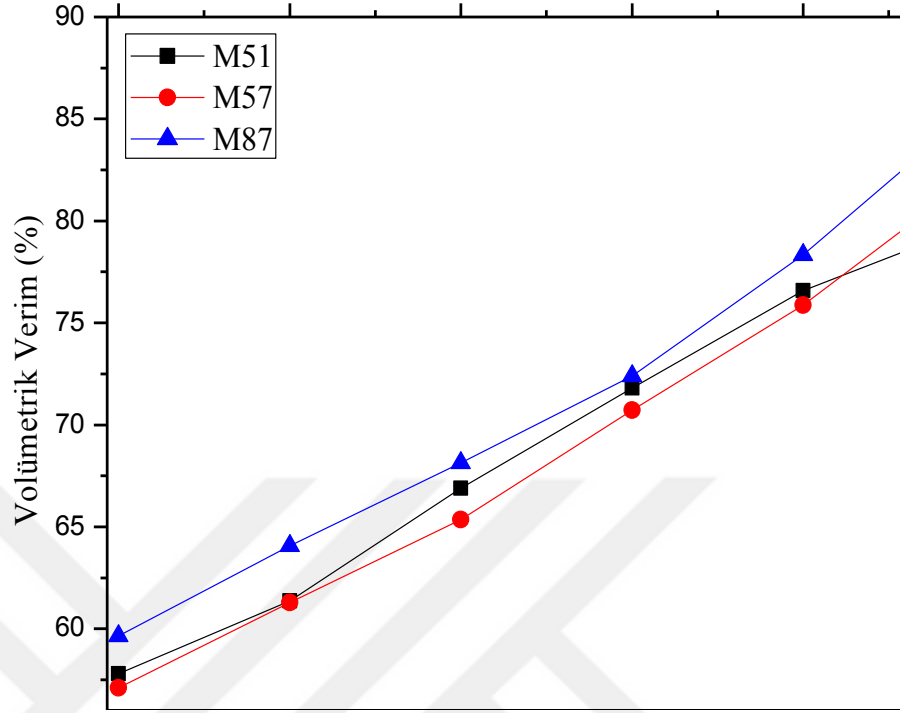
Yakıt Türü	LPG	Doğal gaz	Hidrojen	M51	M57	M87
İçerik (hacimsel, %)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -%30	CH <sub>4</sub> -%85	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> - %51	CH <sub>4</sub> - %57	CH <sub>4</sub> - %87
	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> -%70	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> -%7		CO <sub>2</sub> - %49	CO <sub>2</sub> - %43	CO <sub>2</sub> - %13
		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -%2				
		N <sub>2</sub> -%1				
		CO <sub>2</sub> -%5				
1 atm. & 15°C'deki alt ısı değeri	45,7 MJ/kg	50 MJ/kg	120 MJ/kg	18,6 MJ/m <sup>3</sup>	20,5 MJ/m <sup>3</sup>	31,3 MJ/m <sup>3</sup>
1 atm & 15°C'dekiyoğunluk	2,26	0,79	0,08	-	-	-
Bağıl yoğunluk (g/mol <sub>yakıt</sub> / g/mol <sub>hava</sub> )	-	-	-	1,03	0,97	0,68
Alev hızı (cm/s)	44	34	275	-	-	-
Stokiyometrik yakıt hava oranı (kg <sub>hava</sub> /kg <sub>yakıt</sub> )	15,5	17,3	34,2	4,8	5,7	12,3

Yakıt türüne ve yükleme değerlerine bağlı olarak FÖYT değerinin değişimi Şekil 6.2'de gösterilmiş ve motor yükünün artması ile özgül yakıt tüketiminin azaldığı tespit edilmiştir. M51 yakıtı için 1,5 kW yükleme değerinde fren özgül yakıt tüketimi 5,5 m<sup>3</sup>/kWh iken, yine aynı yakıt için 9 kW yükleme değerinde fren özgül yakıt tüketim değeri 1,6 m<sup>3</sup>/kWh olarak hesaplanmıştır. M51 ve M57 yakıtlarının, M87 yakıtına kıyasla daha düşük Alt Isıl Değere (AID) sahip olmalarından dolayı ortalama fren özgül yakıt tüketimlerinde sırasıyla %14 ve %25 artış olduğu tespit edilmiştir.



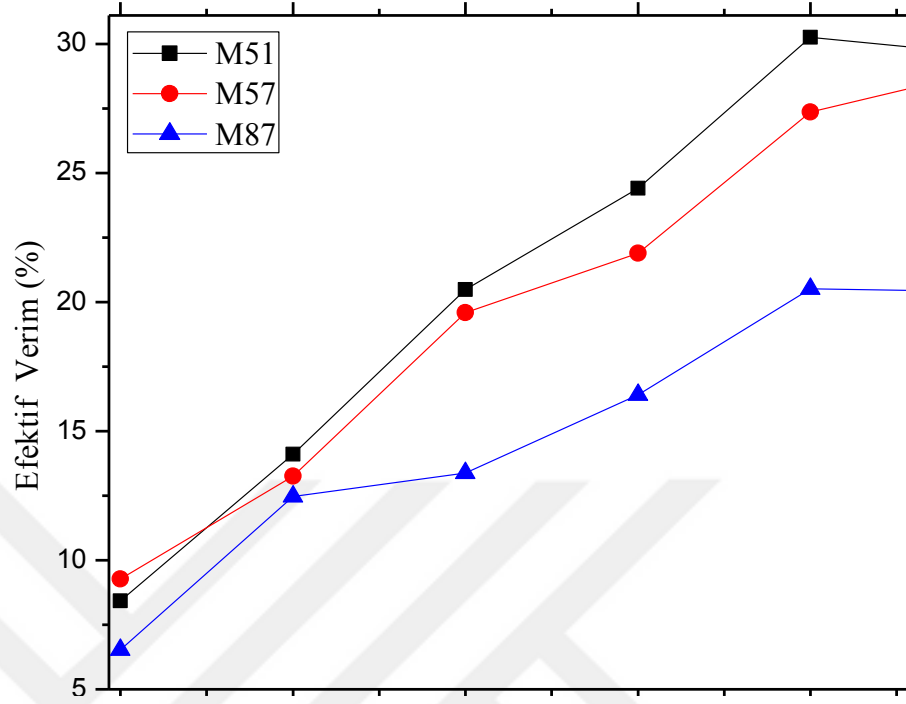
Şekil 6.2. Fren özgül yakıt tüketiminin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Kullanılan yakıt türlerinin motor çıkış gücüne bağlı olarak volümetrik verim değerlerindeki değişimleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Motor yükünün artmasıyla emme zamanında silindirlere daha fazla hava yakıt karışımı alınmakta ve bunun sonucu olarak volümetrik verim artmaktadır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 birlikte incelendiğinde artan volümetrik verim değerine karşın, özgül yakıt tüketiminin azaldığı görülmektedir.



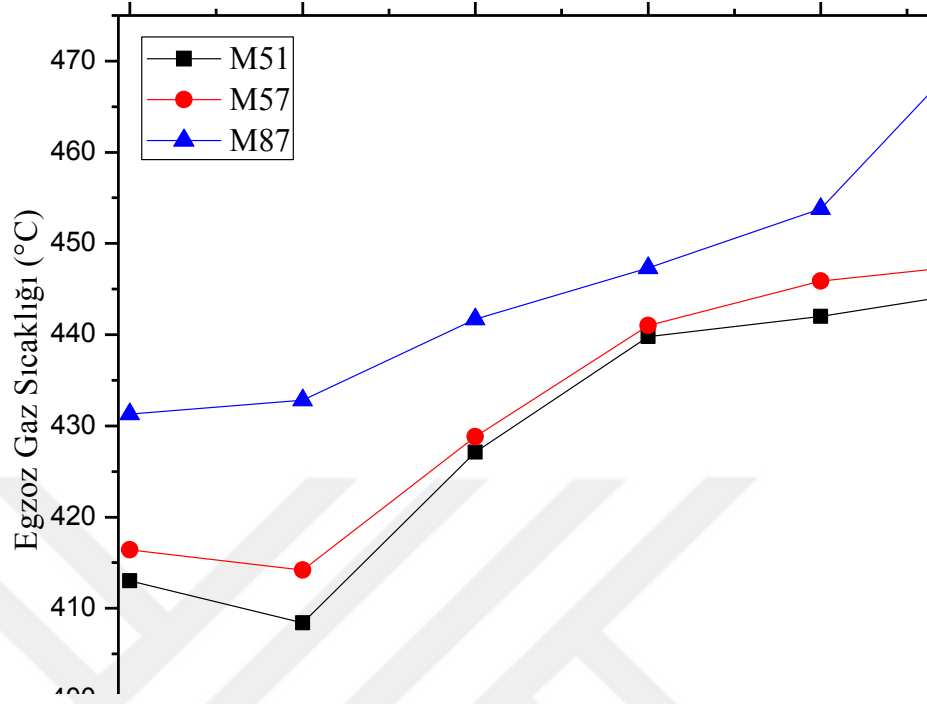
Şekil 6.3. Volümetrik verimin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Efektif verim, motordan alınan net işin motora sürülen ısıya oranı olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda, yakıt türü ve yükleme değerleri için efektif verimindeğişimi Şekil 6.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, motor çıkış gücündeki artışa paralel olarak efektif verim değeri de artmaktadır. M51 yakıtı ile 1,5 kW yükleme değerinde efektif verim%8,4 iken aynı yakıt ile 9 kW yükte efektif verim%29,6 olarak ölçülmüştür. Efektif verim değerinin birbirine paralel olduğu 4,5-7,5kW yük aralığında M51 ve M57 yakıtları ile, M87 yakıtı karşılaştırıldığında sırasıyla%47,5 ve %33,4 daha yüksek efektif verim değerine sahip oldukları tespit edilmiştir. FÖYT değerindeki azalma yakıtın AID'deki artışı tolere edemediği için termal verim aynı güç değerlerinde CH<sub>4</sub> konsantrasyonu düşük olan yakıtta daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Literatürdeki bazı çalışmalarda, biyogazdaki metan oranı arttıkça efektif verimin azaldığı bildirilmiştir [15]. Efektif verim, özgül yakıt tüketim değeri ve karışımın AID'e bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 6.4. Efektif verim değerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

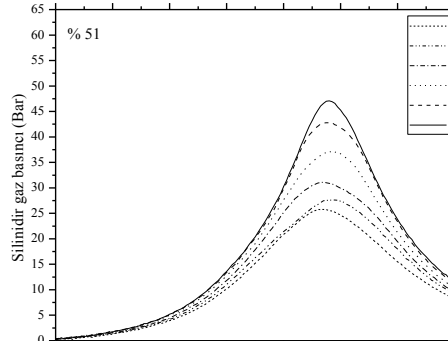
Yakıt türü ve yükleme değerlerine göre egzoz sıcaklığındaki değişim Şekil 6.5’de verilmiş ve biyogazın  $CH_4$  içeriği ile egzoz sıcaklığının doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. En düşük egzoz sıcaklığı M51 yakıtı ile 3 kW yükte  $408\text{ }^\circ\text{C}$ ’de en yüksek egzoz sıcaklığı ise, M87 yakıtı ile 9 kW yükleme değerinde  $474\text{ }^\circ\text{C}$  olarak ölçülmüştür. M87 yakıtı için bünyesindeki  $CH_4$  miktarının fazla olmasının bir neticesi olarak, M51 ve M57 yakıtlarından sırasıyla %7 ve %7,8 daha yüksek egzoz sıcaklığı tespit edilmiştir. Lee ve arkadaşları, yakıt içeriğindeki  $CH_4$  miktarının artmasına bağlı olarak silindiriçi basıncın artması ile, Propam ve arkadaşları ise, yükleme miktarının artmasına bağlı olarak yanmadaki iyileşme ile, egzoz sıcaklığının arttığını çalışmalarında belirtmişlerdir[12,15].



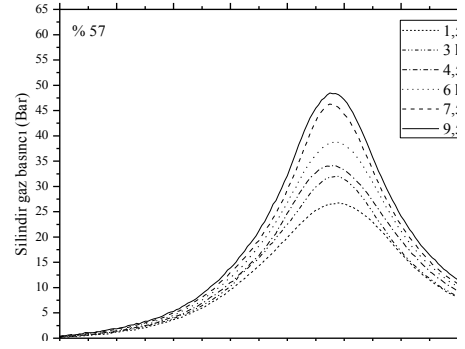
Şekil 6.5. Egzoz sıcaklık değerlerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Farklı yakıt türü ve yükleme değerlerindeki silindir gaz basıncının krank mili açısına göre değişimi Şekil 6.6'da verilmiştir. Çıkış gücünün ve  $CH_4$  konsantrasyonunun artmasıyla birlikte gaz basıncının da arttığı görülmüştür. Bütün motor çıkış gücü ve  $CH_4$  konsantrasyonları için maksimum basınç M87 yakıtı kullanıldığında 9kW yükleme değerinde 57,94 bar olarak ölçülmüş ve bu değer üst ölü noktayı  $12^\circ$  geçte oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca,  $CH_4$  oranı arttıkça maksimum basıncın üst ölü noktaya daha yakın bir krank açısında olduğu ve silindir gaz basıncının daha erken yükselmeye başladığı gözlemlenmiştir. Yüksek  $CH_4$  oranına sahip biyogazlarda yakıtın AID'in artmasıyla silindiriçi basınçlar da artmaktadır [10].

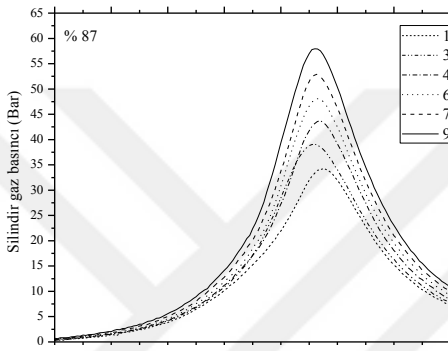




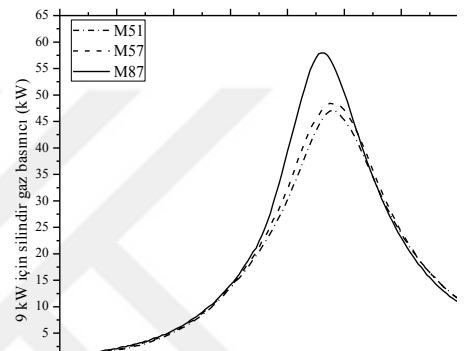
a) M51 yakıtı için



b) M57 yakıtı için



c) M87 yakıtı için



d) Tüm yakıtlar için 9 kW yükte

Şekil 6.6. Silindir içi gaz basınçlarının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Isı yayma oranları Kriger ve Borman tarafından sıcaklık gradyanları, basınç dalgalanmaları, segmanlardaki kaçaklar, yakıt buharı yüzdesi ve karışım oranları ihmal edildiği tek boyutlu model referans alınarak hesaplanmıştır[96]. Kriger ve Borman tarafından yapılan tek boyutlu model aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Q}_n = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (6.1)$$

Eşitlikte;

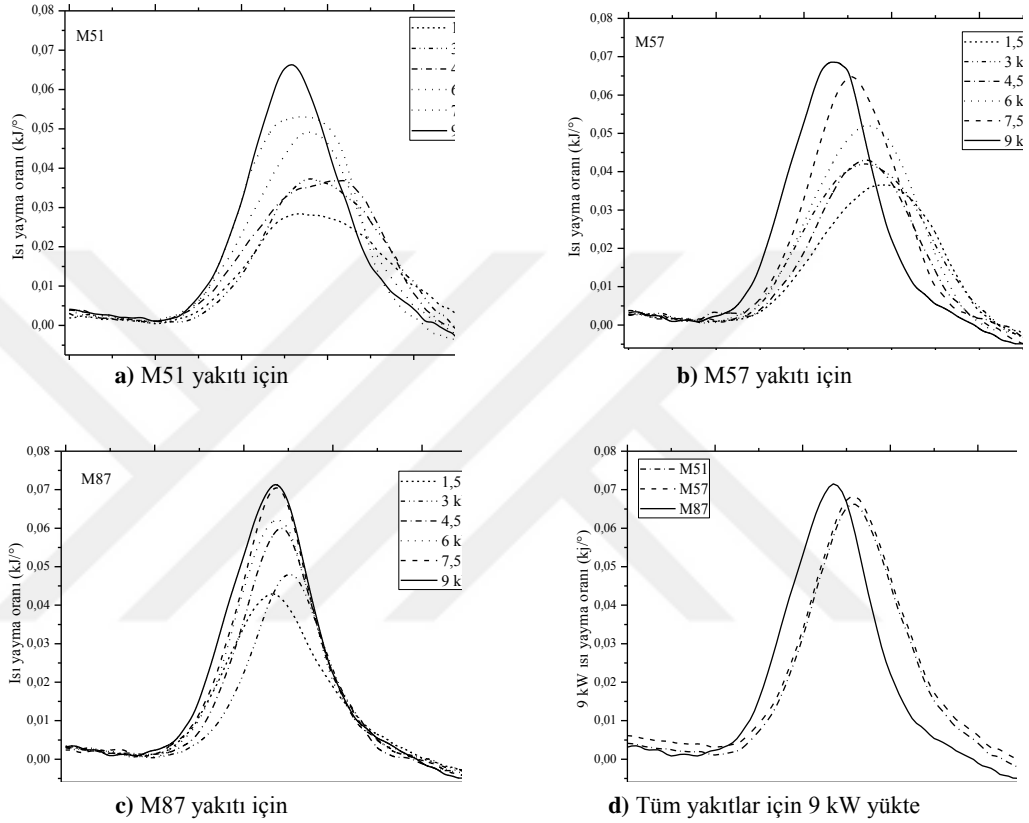
$\dot{Q}_n$  : Krank açısına bağlı olarak açığa çıkan ısı yayılım oranını (kJ/°),

P :Silindir dolgu basıncını (kPa),

V :Silindir hacmini (m<sup>3</sup>),

K : Özgül ısıların oranını, ifade etmektedir.

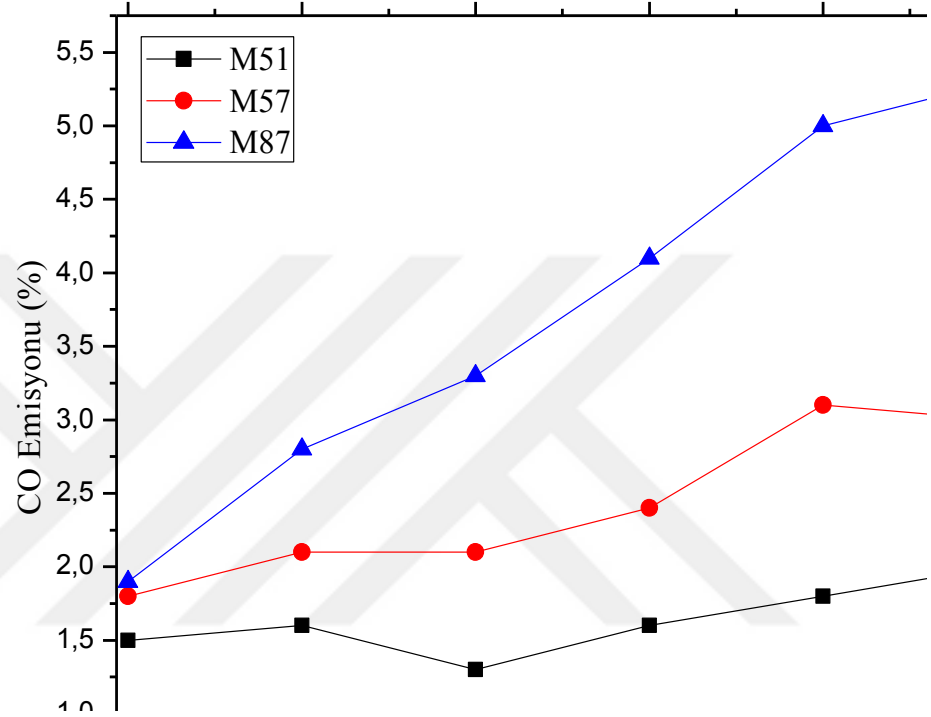
Yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre ısı yayma oranının değişimi, Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Çıkış gücünün artmasıyla ısı yayma oranı üst ölü noktaya daha yakın bölgelerde gerçekleşmekte ve üst ölü noktadan uzaklaştıkça ani bir düşüş göstermektedir.



Şekil 6.7. Isı yayma oranlarının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre, CO emisyonunun değişimi Şekil 6.8'de gösterilmiştir. CO emisyonu, yanma odası içerisinde yetersiz  $O_2$  bulunmasıyla yakıt içerisindeki C atomlarının tam olarak yanamamasıyla oluşur. CO emisyonu yakıtın kimyasal bileşiminde bulunan C atomu sayısı ile de ilişkilidir [97]. Biyogaz içeriğindeki  $CH_4$  konsantrasyonunun ve yükleme değerinin artmasıyla birlikte CO emisyonunun arttığı Şekil 6.8'de açıkça görülmektedir. Yapılan çalışmada, en yüksek CO emisyon değeri, M87 yakıtı ile 9 kW yükleme değerinde %6,3 olarak ölçülmüştür. M87 yakıtıyla M51 ve M57 yakıtları CO emisyon değerleri bakımından karşılaştırıldığında hava-yakıt oranı ve yakıtın kimyasal yapısı gibi faktörlerin etkileri sonucunda ortalama olarak sırasıyla %9,37 ve %5,8 daha az olduğu tespit

edilmiştir. Biyogazın CH<sub>4</sub> içeriğinin artması, motor hızının sabit olması ve aynı zamanda yakılması gereken daha fazla CH<sub>4</sub> olmasından dolayı, tamamlanmamış yanma ile CO emisyonunun artmasına sebep olur [10].



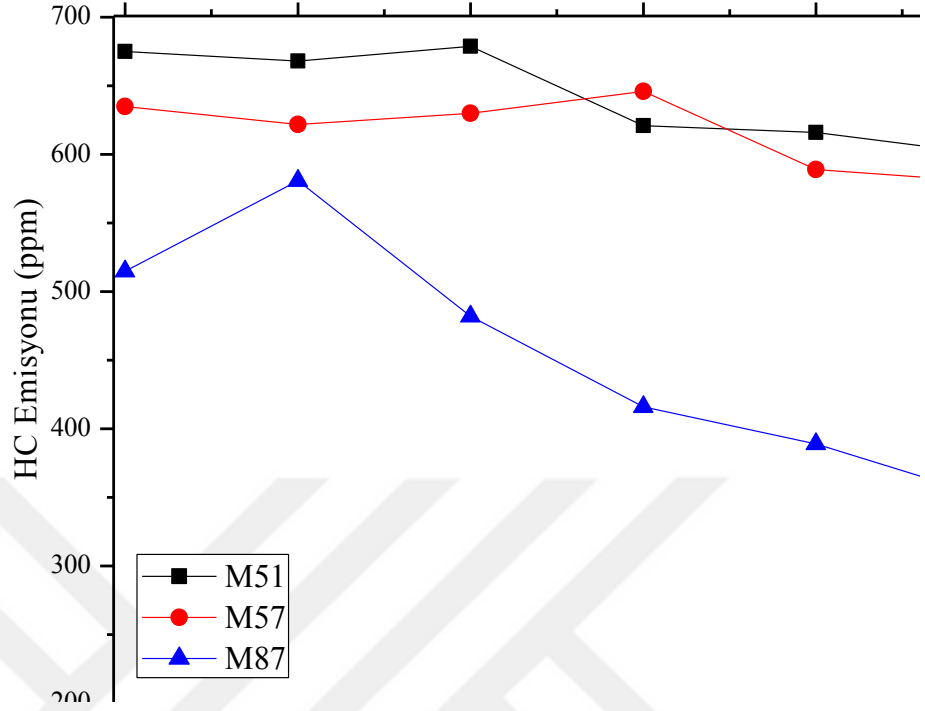
Şekil 6.8. CO emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Literatürde yer alan ve çeşitli çalışma grupları tarafından yapılan çalışmalarda da, yakıt içeriğindeki CH<sub>4</sub> oranı ve yükleme değerlerinin artmasıyla CO emisyonlarının arttığı rapor edilmiştir [8,10].Çizelge 6.2’de Hava-yakıt oranının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi verilmiştir. Hava-yakıt oranı genel olarak CH<sub>4</sub> konsantrasyonu arttıkça artar, yük arttıkça azalır.

Çizelge 6.2. Hava-yakıt oranının yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

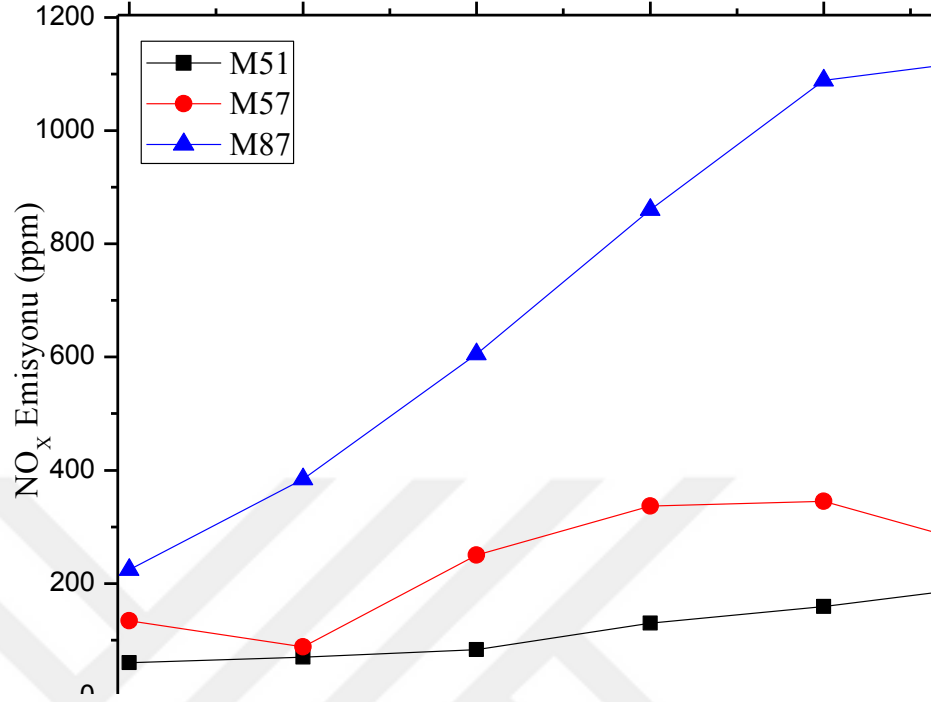
Yük (kW)	M51	M57	M87
1,5	4,42	5,33	10,22
3	4,21	5,24	10,18
4,5	4,18	5,12	10,09
6	4,15	5,03	10,03
7,5	4,08	4,98	9,97
9	4,05	4,76	9,81

Yakıt türüne ve motor yükleme değerlerine göre, yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonunun değişimi Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Toplam HC emisyonları yanmamış HC yakıtlardan oluşmaktadır. HC emisyonlarının oluşmasına sebep olan başlıca nedenler; fazla zengin veya fakir karışımlar sonucunda oluşan eksik yanma, hava-yakıt karışımı içerisinde bulunan yüksek oranda yanmış egzoz gazları, yanma yüzeylerinde oluşan alev sönmesi, yanma odasındaki karbon birikintileri ve silindir cidarındaki yağ tabakasının yakıt tutması olarak sıralanabilir [98]. En yüksek HC emisyon değeri M51 yakıtının kullanılması ile 1,5 kW yükleme değerinde 674 ppm, en düşük HC değeri ise, M87 yakıtı ile 9 kW yükleme değerinde 350 ppm olarak ölçülmüştür. Çıkış gücünün ve biyogaz bünyesindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun artması; yanmanın iyileşmesine, bunun bir neticesi olarak da HC emisyonlarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, literatürde yer alan ve çeşitli gruplar tarafından yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile de uyuşmaktadır [7,12,14,99].



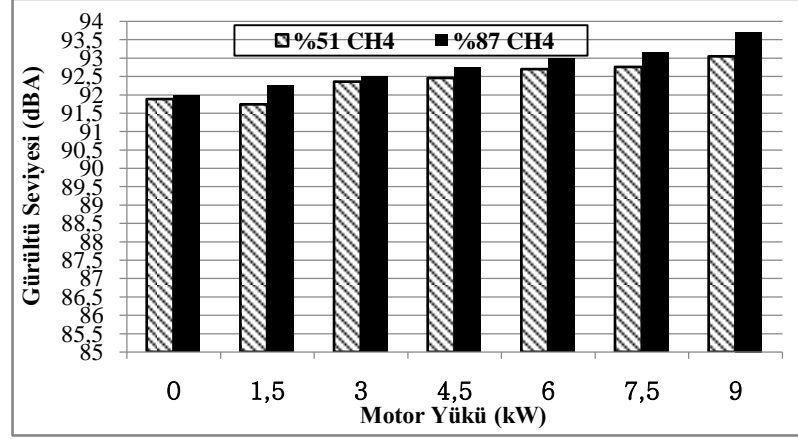
Şekil 6.9. HC emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Havanın içerisinde bulunan azot ve oksijenin yüksek sıcaklıklardaki reaksiyonu sonucu azot oksit emisyonları ( $\text{NO}_x$ ) oluşmaktadır.  $\text{NO}_x$  emisyonu oluşumunu etkileyen başlıca faktörler, oksijen konsantrasyonu, hava-yakıt oranı, yüksek sıcaklıktaki reaksiyon süresi ve yüksek basınçtır. Maksimum  $\text{NO}_x$  konsantrasyonu ise, stokiyometrik şartlardan biraz daha fakir karışımlarda meydana gelmektedir[100–103]. Yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre  $\text{NO}_x$  emisyonu değişimi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada, M51, M57 ve M87 yakıtları için ortalama  $\text{NO}_x$  değerleri sırasıyla; 116 ppm, 235 ppm, 715 ppm olarak ölçülmüştür. Motor yükü arttıkça  $\text{NO}_x$  emisyon değerinin artması, silindir içi basınç ve silindir içi sıcaklığın artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.10. NO<sub>x</sub> emisyonunun yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

İçten yanmalı motorlarda yanma başlangıcında oluşan ani basınç artışı, yanma odası içindeki gaz hareketlerini hızlandırır. Silindir içindeki basınç artışı, yanma odası duvarını doğrudan etkileyerek, motor bloğunda titreşimlere neden olur. Oluşan titreşim ortamında gürültü oluşturur. Şekil 6.11’de her M51 ve M57 yakıtları için motor yüküne bağlı olarak ölçülen ortalama gürültü seviyesi değerleri verilmiştir. Her iki yakıt için de motor yüküne bağlı olarak ortalama gürültü seviyesi artmaktadır.



Şekil 6.11. Ölçülen ortalama gürültü seviyesi değerlerinin yakıt türüne ve yükleme değerlerine göre değişimi.

Tüm motor yüklerinde, M87 biyogaz yakıtı ile M51 biyogaz yakıtına göre daha büyük motor gürültü seviyesine ulaşılmıştır. Bu durum biyogaz içeriğindeki  $CH_4$  oranına ve motor yüküne bağlı olarak artan silindir içi yanma basıncından ve yanma gürültüsünden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, krank mili yatakları, silindir-piston yüzeyleri ve motorun diğer parçaları arasında yüke bağlı olarak artan sürtünme kuvvetleri de gürültüyü artırmaktadır [104-106].

## BÖLÜM 7

### DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, kofermantasyon yöntemiyle çeşitli CH<sub>4</sub> oranlarına sahip biyogaz üretilmiş ve üretilen biyogaz yakıtları buji ateşlemeli bir motorda test edilmiş performans, emisyon ve yanma parametrelerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Fermenterlerde üretilen biyogazın zamana bağlı CH<sub>4</sub> içeriği %71 oranına kadar artış gösterirken, biyogaz üretim miktarı ise, değişkenlik göstermiş ve günlük ortalama 1,6 m<sup>3</sup> olmuştur.
- M51 ve M57 yakıtları, M87 yakıtı ile kıyaslandığında ortalama FÖYT değerlerinde sırasıyla %14 ve %25 artış olduğu ve motor yükünün artması ile özgül yakıt tüketiminin azaldığı tespit edilmiştir.
- Motor yükünün artmasıyla volumetrik verim artmış, volumetrik verimin artması ise, özgül yakıt tüketiminin düşmesine sebep olmuştur.
- Motor çıkış gücündeki artışa paralel olarak efektif verim değeri de artış göstermiştir.
- Biyogazın CH<sub>4</sub> içeriği ile egzoz sıcaklığı doğru orantılı olarak değişim göstermiştir. M51 ve M57 yakıtları ile M87 yakıtı ortalama egzoz sıcaklıkları arasında sırasıyla %3,94 ve %3,23 azalma gözlenmiştir.
- Biyogaz içeriğindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun artmasıyla, silindir içi maksimum gaz basıncının üst ölü noktaya daha yakın bir krank açısında olduğu ve silindir içi gaz basıncının daha erken yükselmeye başladığı tespit edilmiştir.
- Biyogazın CH<sub>4</sub> konsantrasyonu ve çıkış gücünün artmasıyla, CO emisyonu artmıştır. M51 ve M57 yakıtları ile M87 yakıtı kullanımı sonucu açığa çıkan CO emisyonları karşılaştırıldığında, tüm yük koşulları altında sırasıyla ortalama %9,37 ve %5,8 azalma olduğu belirlenmiştir.



- Çıkış gücünün ve biyogaz bünyesindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun artmasının; yanmanın iyileşmesine sebep olduğu ve bunun HC emisyonlarını azalttığı belirlenmiştir. M51, M57 ve M87 yakıtlarının ortalama HC emisyonları sırasıyla 644, 617 ve 456 ppm olduğu gözlenmiştir.
- Biyogazın bünyesindeki CH<sub>4</sub> içeriğinin artışına bağlı olarak artan AID ile egzoz gaz sıcaklığı da yükselmiştir.
- Biyogazın bünyesindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun ve motor yükünün artması, silindir içi basınç ve sıcaklığının artmasına ve bunların bir neticesi olarak ta, NO<sub>x</sub> emisyonunun artmasına sebep olmuştur.
- Biyogaz içeriğindeki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun artması ile silindir içindeki basınç artışı, yanma odası duvarını doğrudan etkileyerek, motor bloğunda titreşimlere neden olur. Oluşan titreşim ortamda gürültü oluşturur. M51 ve M87 karşılaştırıldığında, M87 yakıtı tüm yükler için ortalama %0,4 oranında daha fazla gürültü emisyonu oluşturmuştur.
- Krank mili yatakları, silindir-piston yüzeyleri ve motorun diğer parçaları arasında yüke bağlı olarak artan sürtünme kuvvetleri nedeni ile motor yükü arttıkça gürültü emisyonu da artar. M51 ve M87 yakıtları için yük 1,5 kW dan 9 kW ya çıkarıldığında gürültü emisyonu sırası ile %1,5 ve %1,3 oranında artmıştır.

Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ışığında biyogaz ve biyogazın motorlarda kullanımı konularında yapılacak yeni çalışmalarda:

- Biyogazın saflaştırılması ve içeriğindeki kirleticilerin giderilerek CH<sub>4</sub> oranlarının artırılması amacıyla, alternatif yöntemler geliştirilebilir ve bu yöntemler deneysel çalışmalar ile desteklenebilir.
- Biyogazın motorlarda kullanımı konusunda hazırlanacak olan test sistemlerinde dizel bir motora buji ilavesi ile ufak bir modifiye yaparak biyogaz yakıtı ile kullanılacak yeni çalışmalar yapılabilecektir. Buji ilavesi yapılan bir dizel motorda farklı sıkıştırma oranlarında, farklı metan konsantrasyonlarına sahip yakıtlar kullanılabilir, motor titreşimleri ve emisyon değerleri ölçülebilir. Bu doğrultuda yapılacak bir çalışma motor ve yakıt üreticilerine çalışmalarında ışık tutacaktır.

- Alternatif yakıt kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla biyogaz, farklı oranlarda petrol kaynaklı yakıtlar ile farklı yapısal özelliklere sahip motorlarda test edilebilir ve uygun çalışma koşulları tespit edilebilir.
- Çeşitli CH<sub>4</sub> konsantrasyonlarına sahip biyogaz yakıtının Motor-jeneratör set ünitesinde yakılması işlemi için sistemin enerji ve ekserji analizleri yapılabilir.
- Motor-jeneratör ünitesinde motor soğutma suyu ve egzoz gazından elde edilen ısının biyogaz tesislerindeki ısıtma ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılabilirliği ve biyogaz sistemlerinde hangi oranlarda enerji geri kazanımı sağlanabileceği tespit edilebilir.



## KAYNAKLAR

1. K krcer, B.,“Hidrojen enerjisinin geliflme potansiyeli ve Türkiye ekonomisi açısından değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi,*Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü*, 10-30 (2007).
2. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,Enerji İfleri Genel Müdürlüğü,“2015 Enerji İfleri Genel Müdürlüğü Bülteni”, [http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT/1/Documents/E%C4%B0GM%20Periyodik%20Rapor/Mart-Nisan%20B%C3%BClteni\\_son.pdf](http://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT/1/Documents/E%C4%B0GM%20Periyodik%20Rapor/Mart-Nisan%20B%C3%BClteni_son.pdf) (2015).
3. Etemoğlu, A. B., ve İflman M. K.,“Enerji kullanımının teknik ve ekonomik analizi”,*Mühendis ve Makine*, 45 (529):19-23 (2004).
4. Çağman,S.,“Anaerobik fermantasyonla elde edilen biyogazda nem ve hidrojen sülfürün gideriminin deneysel incelenmesi”, Doktora Tezi,*Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,10-20 (2014).
5. Eyidoğan, M.,“Biyogazın saflafltırılması ve motorlu taflıt olarak kullanılması”,*Mühendis ve Makine*,49 (584): 18-24 (2008).
6. İnternet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,Enerji İfleri Genel Müdürlüğü, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları - Biyogaz”,<http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx>(2016).
7. Tadrous,M.,“Achieving Low Emissions from a Biogas Fuelled SI Engine Using a Catalytic Converter”, Master of Degree, *Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Toronto*, 20-50 (2012).
8. Porpatham, E., Ramesh, A., and Nagalingam, B.,“Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine”,*Fuel*, 7 (6-7): 1651-59 (2008).
9. Ravi, M., Kumar, K. V., and Murugesan, A., “Certain investigations on the performance of emission, vibration and noise characteristics of CI engine using bio gas and bio diesel as alternate fuel”,*International Journal of PharmTech Research*,8 (1): 11-19 (2015).
10. G mez, M., Amell, A., and Zapata, L.,“Spark ignition engine performance and emissions in a high compression engine using biogas and methane mixtures without knock occurrence”,*Thermal Science*, 19 (6): 1919-30 (2015).
11. Lee, J.,“A Study on performance and emissions of a 4-stroke IC engine operating on landfill gas with the addition of H<sub>2</sub>, CO and syngas”,*Master of Degree,Department of Earth and Environmental Engineering (HKSM) Fu*

*Foundation School of Engineering and Applied Science Columbia University*, 30-56 (2010).

12. Porpatham, E., Ramesh, A., and Nagalingam, B., "Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine", *Energy Conversion and Management*, 76: 463-71 (2013).
13. Jatana, G. S., Himabindu, M., Thakur, H. S., and Ravikrishna R. V., "Strategies for high efficiency and stability in biogas-fuelled small engines", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54:189-95 (2013).
14. Arroyo, J., Moreno, F., Muñoz, M., Monné, C., and Bernal, N., "Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with synthetic gases derived from biogas", *Fuel*, 117: 50-58 (2014).
15. Lee, T. H., Huang, S. R., and Chen, C. H., "The experimental study on biogas power generation enhanced by using waste heat to preheat inlet gases", *Renewable Energy*, 50: 342-47(2013).
16. Makareviciene, V., Sendzikiene, E., Pukalskas, S., Rimkus, A., and Vegneris, R., "Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation", *Energy Conversion and Management*, 75: 224-33 (2013).
17. Barik, D., and Murugan, S., "Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas-diesel in dual fuel mode", *Energy*, 72: 760-71 (2014).
18. Byun, J.S., and Park, J., "Predicting the performance and exhaust NO<sub>x</sub> emissions of a spark-ignition engine generator fueled with methane based biogases containing various amounts of CO<sub>2</sub>", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22: 196-202 (2015)
19. Jeong, C., Kim, T., Lee, K., Song, S., and Chun, K. M., "Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 9620-27 (2009).
20. Luijten, C. C. M., and Kerkhof, E., "Jatropha oil and biogas in a dual fuel CI engine for rural electrification", *Energy Conversion and Management*, 52: 1426-38 (2011).
21. Ray, N. H., Swain, P. R., and Mohanty, M. K., "An investigation on performance characteristics of CI engine using biogas and diesel in dual fuel mode", *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 3: 1716-23 (2014).
22. Heidary, B., Hassan-Beygi, S. R., and Ghobadian, B., Taghizadeh A., "Vibration analysis of a small diesel engine using diesel-biodiesel fuel blends", *Agricultural Engineering International Journal*, 15: 117-26 (2013).

23. Kahraman, N., Akansu, S. O., ve Albayrak, B., “İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak hidrojenin kullanılması” *Mühendis ve Makine*, 48 (569): 9-15 (2007).
24. Vorst, W, and Finegold, J.G., “Automotive Hydrogen Engines and Onboard Storage Methods”, *Hydrogen Fundamentals*, Miami Beach, Florida, USA (1975).
25. Eyidoğan, M., “Etanol-benzin ve metanol-benzin karışımlarının buji ateşlemeli bir motorun yanma karakteristiği ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 10-50 (2009).
26. Şenbahçe, A., “Alkol yakıtların buji ateşlemeli motorlarda kullanımının performans ve emisyonlara etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 15-35 (2013).
27. Özertaş, Z., “Lpg’ye hidrojen ilavesinin bujiile ateşlemeli bir motorun performans ve emisyonlarına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-25 (2014).
28. Özcan, F., “Buji ateşlemeli bir motorda LPG ve CNG (sıkıştırılmış doğal gaz) kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 3-21 (2010).
29. TMMOB: “LPG-CNG’ye dönüştürülmüş araçlarda denetim uygulamaları oda raporu” *III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Yayını (2008).
30. Deniz, Ç., “Biyodizel dizel karışımlarının bazı fiziksel özelliklerinin biyodizel oranı ile değişimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 15-40 (2013).
31. Koç, M., “Biyodizel üretimine uygun Türkiye’de yetişen ve yetiştirilecek bitkilerin vebiyodizel teknolojilerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 20-45 (2011).
32. Uysal, M., “%15 H<sub>2</sub> ilaveli biyogaz karışımlarının içten yanmalı motorlarda deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 5-13 (2012).
33. Uyarel, A.Y., ve Erşan, K., “İçten yanmalı motorlarda biyogaz kullanımı ve motor performansına etkisi”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 1: 47-61 (1987).
34. Erickson, L. E., Fayet, E., Kakumanu, B. K., and Davis, L. C., “Anaerobic Digestion” Carcass Disposal: A Comprehensive Review, *National Agricultural Biosecurity Center Consortium Carcass Disposal Working Group*, 1-19 (2004).

35. Eryaşar,A.,“Kırsal kesime yönelik bir biyogaz sisteminin tasarımı, kurulumu, testi ve performansına etki eden parametrelerin araştırılması”, Doktora Tezi,*Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 20-200 (2007).
36. Arıcı,Ş.,“Biyogaz üretiminde farklı tarımsal atıkların birlikte fermentasyonunun biyokimyasal parametreler açısından incelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi,*Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 20-60(2009).
37. Buğutekin,A.,“Atıklardan biyogaz üretiminin incelenmesi”, Doktora Tezi. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 20-75(2007).
38. Consolidated Management Services,“Energy and environmental technology A system approach to biogas technology ”,*FAO/TCP/NEP/4415-T.*, Nepal, 1-20 (1996).
39. Acaroğlu,M.,“Alternatif Enerji Kaynakları”,*Nobel Yayıncılık*, Ankara, 1-180(2013).
40. Bhat, P. R., Chanakya, H. N., and Ravindranath, N. H.,“Biogas plant dissemination: success story of Sirsi, India”,*Energy for Sustainable Development*, 5:39-46 (2001).
41. Singh, K. J., and Sooch, S. S.,“Comparative study of economics of different models of family size biogas plants for state of Punjab, India”,*Energy Conversion and Management*,45: 1929-41 (2004).
42. Xiaohua, W., and Jingfei, L.,“Influence of using household biogas digesters on household energy consumption in rural areas a case study in Lianshui County in China”,*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9: 229-36 (2005).
43. Öztürk,M.,“Hayvan gübresiden biogaz üretimi”,*Çevre ve Orman Bakanlığı*, Ankara, 20-48 (2005).
44. Koca,A.,“Yenilenebilir Bir Enerji Kaynağı: Biyogaz”,*Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 5 (3): 32-35 (2007).
45. Kaygusuz, K., Türker M. F.,“Biomass energy potential in Turkey”,*Renewable Energy*,26: 661-78 (2002).
46. Güç,A.,“Büyükbaş hayvan atığından biyogaz üretimi ve uşak ili için çevresel etkilerinin değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi,*Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 10-25 (2010).
47. Koçar,G., Eryaşar,A., Ersöz,Ö., Arıcı,Ş., veDurmuş,A.,“Biyogaz Teknolojileri”, *Ege Üniversitesi*, İzmir, 10-40 (2010).
48. Murphy, J., “Task 37 Biogas Country Report 2011”, *The Sustainable Energy Authority of Ireland's*, Dublin, 17-40 (2011).

49. Ertem, F. C., "Türkiye'de Biyogaz Yatırımları İçin Geçerli Koşulların Ve Potansiyelin Değerlendirilmesi", *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, 10-40 (2011).
50. Koçer,N.,ve Ünlü,A., "Doğu Anadolu Bölgesinin Biyokütle Potansiyeli ve Enerji Üretimi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 5 (2): 175-81 (2007).
51. Gerardi, M.H., "Wastewater Bacteria", *John Wiley & Sons*(2006).
52. Testa, C., Cornacchia, G., Notornicola, M., Voltasio, F., and Sharma, V. K., "Anaerobic digestion of semi-solid waste: biogas production and its purification", *Energy Conversion Management*,43: 63-75 (2002).
53. El-Halwagi, M. M., "Biogas Technology, Transfer, and Diffusion: Proceedings of the International Conference Held at the National Research Centre,", *Elsevier Applied Science Publishers : Sole Distributor In The USA And Canada, Elsevier Pub. Co*, London ; New York, 720 (1999).
54. Rajeshwari, K. V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., and Kishore, V. V. N., "State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment", *Renewable and Sustainable EnergyReviews*, 4: 135-56 (2000).
55. Pekin,B., "Biyokimya Mühendisliği (Biyoteknoloji)", *Ege Üniversitesi Kimya Fakültesi Yayınları*, İzmir(1983).
56. Tiwari, G. N., Usmani, J.A., and Chandra A., "Determination of period for biogas production", *Energy Conversion and Management*, 37: 199-203 (1996).
57. Marchaim, U., "Biogas processes for sustainable development", *Food & Agriculture Org.*, Israel (1992).
58. Braun, R. "Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe: Grundlagen und Anwendungsbeispiele", *Springer*, Germany (1982).
59. Pala, N., "Biyogaz Üretimi ve Kullanımı El Kitapçığı", *Yenilenebilir Hammaddeler İhtisas Ajansı*, Ankara, 1-100 (2010).
60. Bayraktar,M., "Hayvan ve işlenmiş süt atıklarından biyogaz vve hidrojen üretiminin termodinamik açıdan araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Balikesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 20-50 (2011).
61. Şen,M., "Bolu'daki tavuk çiftliklerinin biyogaz kapasitesinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4-36 (2010).
62. Arnott,M., "The Biogas/Biofertilizer Business Handbook", *Peace Corps*, Washington,19-63(1985).

63. Chynoweth, D.P., and Isaacson, R.,“Anaerobic Digestion of Biomass”,*Springer* (1987).
64. Alvarez, R., Villca, S., and Lidén, G.,“Biogas production from llama and cow manure at high altitude”,*Biomass and Bioenergy*, 30: 66-75 (2006).
65. Gül, N.,“Tavuk Gübresinden Biyogaz Üretim Potansiyelinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,15-50 (2006).
66. Werner,U., Stöhr,U., andHees, N., “Biogas plants in animal husbandry”,*GTZ-Gate*, 20-83(1989).
67. Burkut,E.,“Suyun pH Derecesi”,*Su ve Çevre Teknolojiler Dergisi*7:26-27 (2012).
68. Kaya D., ve Öztürk H.,“Biyogaz Teknolojisi”,*Umuttepe Yayınları*,İzmit, 10-30 (2012).
69. Verma,S.,“Anaerobic Digestion Of Biodegradable Organics In Municipal Solid Wastes”, Master of Science Degree, *Fu Foundation School of Engineering & Applied Science Columbia University*,1-15(2002).
70. Edelmann, W., Baier, U., and Engeli, H.,“Environmental aspects of the anaerobic digestion of the OFMSW and agricultural wastes”,*ResearchGate*,52: 553-59 (2005).
71. Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D. J., Delgenès, J. P., and Steyer, J. P.,“Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, 183: 1-15 (2010).
72. Sonesson, U., Björklund, A., Carlsson, M., and Dalemo, M.,“Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste”,*Resources, Conservation and Recycling*, 28: 29-53 (2000).
73. Hartmann,H., Moller ,H. B., and Ahring,B. K.,“Efficiency of the anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste: collection and pretreatment”, *Waste Management & Research*,22: 35-41 (2004).
74. Das,A., andMondal,C.,“Biogas Production from Co-digestion of Substrates: A Review”,*International Research Journal of Environment Science*, 5: 49-57 (2015).
75. Köttner, M., “Dry Fermentation a New Method for Biological Treatment”, *International Biogas and Bioenergy Centre of Compenrence (IBBC)*, Garmany 16: 1-16 (2002).
76. Omer, A. M., and Fadalla, Y.,“Biogas energy technology in Sudan”, *Renewable Energy*, 28: 499-507 (2003).



77. Sagagi, B., Garba, B., and Usman, N.,“Studies on biogas production from fruits and vegetable waste”,*Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 2: 115-118 (2009).
78. El-Mashad, H. M., and Zhang, R.,“Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste”,*Bioresource Technology*, 101: 4021-28 (2010).
79. Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., and Tan, T.,“The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure”, *Bioresource Technology*, 129: 170-76 (2013).
80. Nayono, S. E., Gallert, C., and Winter, J.,“Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production”,*Bioresource Technology*, 101: 6987-93 (2010).
81. Belostotskiy, D., Jacobi, H. F., Strach, K., and Liebetrau, J.,“Anaerobic digestion of chicken manure as a single substrate by control of ammonia concentration”,*AD13 Recovering (Bio) Resources for the World* (2013).
82. Güngör-Demirci,G., and Demirer,G. N.,“Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure”,*Bioresource Technology*, 93: 109-17 (2004).
83. Liu, Z. G., Zhou, X. F., Zhang, Y. L., and Zhu, H. G.,“Enhanced Treatment of CSTR Anaerobic Digested Effluent from Poultry Wastewater by IC Reactor”, *Advanced Materials Research*, 433-440: 1239-44 (2012).
84. Salminen, E., Rintala, J.,“Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review”,*Bioresource Technology*, 83: 13–26 (2002).
85. Bujoczek, G, Oleszkiewicz, J, Sparling, R, and Cenkowski, S. “High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure”,*Journal of Agricultural Engineering Research* 76:51–60(2000).
86. Jasko, J., Skripsts, E., Dubrovskis, V., Zabarovskis, E., and Kotelenecs, V., “Biogas production from cheese whey in two phase anaerobic digestion”,*Engineering for Rural Development*, 373–376 (2011).
87. Fox,P. F., McSweeney,P. L. H., Cogan,T. M., and Guinee,T. P.,“Fundamentals of Cheese Science”*Springer*, US(2000).
88. Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., and Mavris, V.,“Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure”,*Renewable Energy*, 32: 2147-60 (2007).
89. Kavacik, B., and Topaloglu, B.,“Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure”,*Biomass and Bioenergy*, 34: 1321-29 (2010).

90. Kishore,V. V. N., Raman,P., and Rao,V. V. R.,“Fixed dome biogas plants. A design, construction and operation manual”,*Tata Energy Research Institute* (1987).
91. Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. vol. *ISO 362-1:2007* (2007).
92. Ghojel, J., and Honnery, D.,“Heat release model for the combustion of diesel oil emulsions in DI diesel engines”,*Applied Thermal Engineering*, 25: 2072-85 (2005).
93. Monyem,A.,“The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions”, Ph.D. Thesis. *Iowa State University*(1998).
94. Sita Rama Raju,A. V., “Experimental Investigations on The Performance of a Lean Burn Spark Ignited Gas Engine”, Ph.D. Thesis, *I.C.Engines Lab, IIT Madras*(2001).
95. Ludington, D., “Calculating the heating value of biogas”,*DLtech, Inc*, New York(2006).
96. Krieger, R. B., and Borman,G. L.,“The Computation of Applied Heat Release for Internal Combustion Engines”,*ASME Paper*, 66-WA/DGP-4 (1966).
97. Ergeneman,M., Kutlar,A., Arslan,H., ve Mutlu, M.,“Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler”,*Birsen Yayınevi*,İstanbul(1998).
98. Wu, C. W., Chen, R.H , Pu, J. Y., and Lin, T. H.,“The influence of air–fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline-blended fuels”,*Atmospheric Environment*, 38: 7093–7100(2004).
99. Huang, J., and Crookes, R. J.,“Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine”, *Fuel*, 77: 1793-801 (1998).
100. Çelik, M. B.,“Experimental determination of suitable ethanol–gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine”,*Applied Thermal Engineering*, 28: 396-404 (2008).
101. Basshuysen,R.V., and Schäfer,F.,“Internal Combustion Engine Handbook”, *SAE International*, USA(2004).
102. Eyidogan, M., Ozsezen, A. N., Canakci, M., and Turkcan, A.,“Impact of alcohol–gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine”,*Fuel*, 89: 2713-20 (2010).
103. Çelik, M. B., Özdalyan, B., and Alkan, F.,“The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine”,*Fuel*,90: 1591-98 (2011).

104. Karagöz,M., Sarıdemir,S., Deniz,E., and Çiftçi,B.,“Analysing the Effect of the Methane Ratio in Biogas on the Noise Emission of a Spark Ignited Engine” *Sylwan Journal*, 8:406-16 (2016).
105. Alahmer, A., and Aladayleh, W.,“Effect two grades of octane numbers on the performance, exhaust and acoustic emissions of spark ignition engine”,*Fuel*, 180: 80-89 (2016).
106. Alahmer, A. I., Adaileh, W. M., and Zubi, M. A. A.,“Monitoring of a spark ignition engine malfunctions using acoustic signal technique”,*International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10 (3):201-12 (2014).





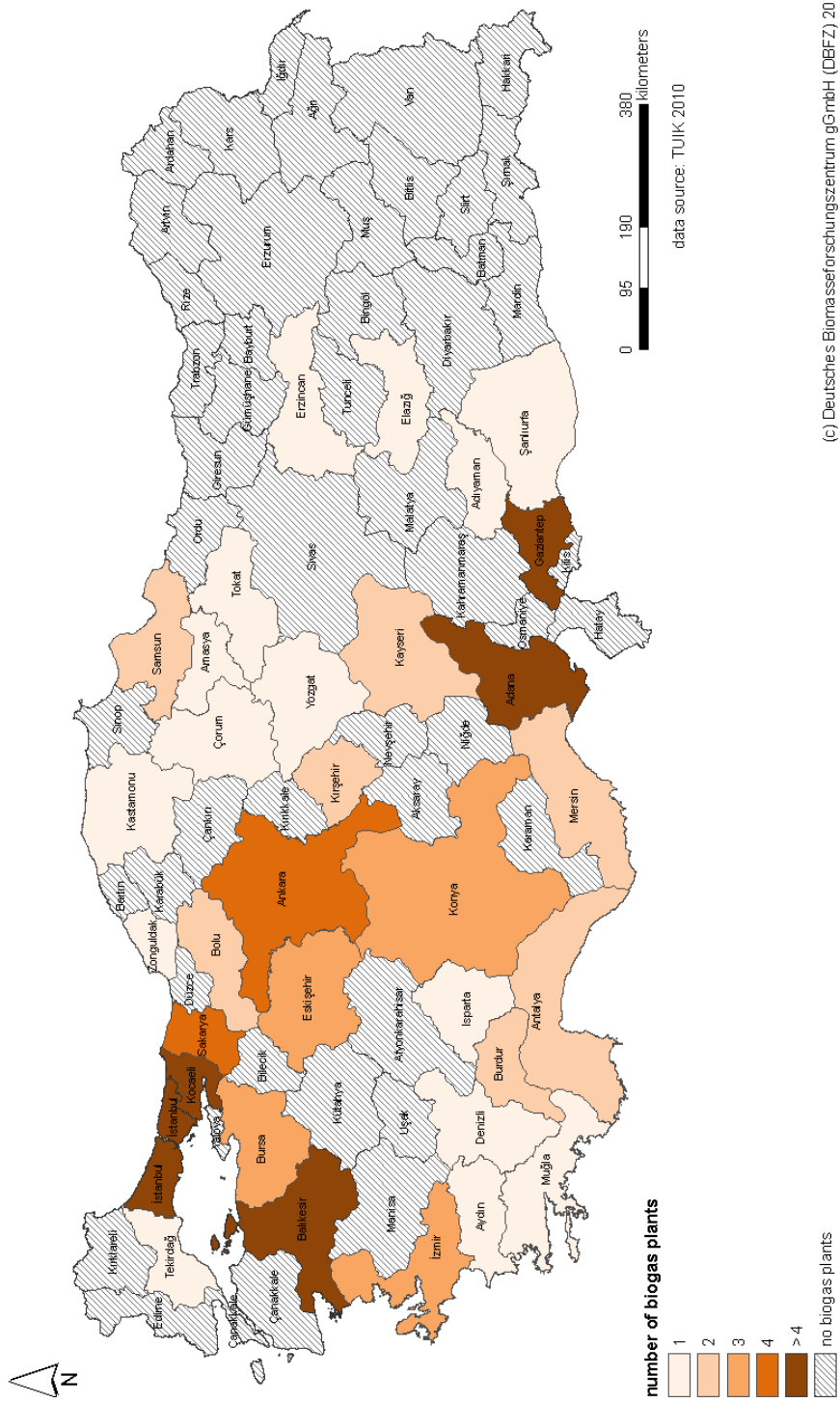
**EK AÇIKLAMALAR A.**

**YALITIM SONRASI FERMENTÖRLERİN TERMAL KAMERA  
GÖRÜNTÜLERİ**



**EK AÇIKLAMALAR B.**

**TÜRKİYE'DEKİ İŞLETMEDE VE PLANLAMADA OLAN BİYOGAZ TESİS  
SAYILARI**



(c) Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) 2011



**EK AÇIKLAMALAR C.**

**YÜK HÜCREŞİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ**



Maksimum kapasite (E <sub>max</sub> )	kg	1000
Minimum ölçüm aralığı (V <sub>min</sub> )		E <sub>max</sub> /5000 E <sub>max</sub> /10000
Toplam hata	%	≤ ±0,05 ≤ ±0,02
Aşırı yükleme kapasitesi	%E <sub>max</sub>	150
Aşırı yan yükleme kapasitesi	%E <sub>max</sub>	100
Kırılma kapasitesi	%E <sub>max</sub>	300
Esneme (E <sub>max</sub> yükte)	mm	≤0,3
Maksimum uyarma gerilimi (U <sub>max</sub> )	V	15
Kazanç (C <sub>n</sub> )	mV/V	2 ±0,1%
Yüksüz çıkış	%C <sub>n</sub>	≤ ±1,0
Giriş direnci	Ω	385 ±20
Çıkış direnci	Ω	350±3
Çalışma sıcaklığı aralığı	°C	-40...+80
Yük Hücresi malzemesi		Paslanmaz Çelik
Ağırlık	kg	1,1
Paket ebatları / ağırlığı	cm/kg	10x27x6/1,2

**EK AÇIKLAMALAR Ç.**

**SEVİYE TESPİT CİHAZI TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

<b>Marka</b>	Autrol
<b>Model</b>	APT3200
<b>Hassasiyet</b>	% $\pm 0,075$
<b>Bağlantı Şekli</b>	Yatay veya dikey bağlantı
<b>Gövde Malzemesi</b>	Paslanmaz Çelik
<b>Çalışma Basıncı</b>	0-2,5 Bar
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>	-4 - +120 °C
<b>Kullanım Alanı</b>	Sıvı veya gaz akışkanlarda
<b>Çıkış Voltajı</b>	4-20 mA



**EK AÇIKLAMALAR D.**

**FARK BASINÇ TRANSMİTTERİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

<b>Doğrusallık ve histerezis hatası</b>	< ± 1 % of FS
<b>Çalışma sıcaklığı</b>	0 den +50°C
<b>Depolama sıcaklığı</b>	-10 den +70°C
<b>Uzun süreli stabilite</b>	< ± %0,5 den 2,5% FS / yıl
<b>Pozisyona bağlı hata oranı</b>	< ± % 0,02 FS / g
<b>Tepki süresi</b>	100 ms yada 1 s
<b>Maksimum yük</b>	<500 ohm
<b>Sistem bağlantısı</b>	6 mm hortum
<b>Üretim malzemesi</b>	ABS plastik
<b>Boyutlar</b>	Ø 85 x 58 mm
<b>Ağırlık</b>	130 g
<b>Koruma kategorisi</b>	EN60529 IP54
<b>Standartlar / Uygunluk</b>	EN60770, EN61326

**EK AÇIKLAMALAR E.**

**MICROMASTER 440 MOTOR SÜRÜCÜSÜ TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

<b>Gerilim ve Güç Aralıkları</b>	200-240 V, $\pm\%10$ 1 AC, 0,12'den 3kW'a kadar (0,16-4 HP aralığı) 200-240 V, $\pm\%10$ 0,12'den 45kW'a kadar (0,16-60 HP aralığı) 380-480 V, $\pm\%10$ 0,37'den 250kW'a kadar (0,5-350 HP aralığı) 500-600 V, $\pm\%10$ 0,75'den 90kW'a (1,0-125 HP aralığı)
<b>İşletme Sıcaklığı</b>	0,12'den 75 kW'a kadar (0,16-100 HP aralığı) (CT): -10°C ve +50°C aralığı 90'dan 200 kW'a kadar (125-270 HP aralığı) (CT): 0°C ve +40 °C aralığı
<b>Süreç Denetimi</b>	Dahili PID Kontrolü
<b>Kontrol Tipleri</b>	Kapalı çevrim vektör kontrol, FCC (Flux Current Control=Akı Akımı Kontrolü), Çok noktalı Karakteristik (parametrelenebilir V/f Karakteristiği), V/f Karakteristiği
<b>Girişler</b>	6 dijital giriş, 2 analog giriş, 1 PTC/KTY giriş
<b>Çıktılar</b>	2 analog çıkış, 3 röle çıkışı

**EK AÇIKLAMALAR F.**

**GAZAKIŞ ÖLÇERİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ**



<b>Malzeme</b>	Paslanmaz Çelik
<b>Çıkış Sinyali</b>	0-5 V DC
<b>Giriş gücü</b>	24 V DC
<b>Doğruluk</b>	+/-% 1
<b>Yenileme</b>	+/-%0,15
<b>Bağlantı</b>	9 Pin dişi
<b>Kontrol sinyali</b>	0-5 V DC
<b>Ölçüm aralığı</b>	0-10 lt/dk
<b>Maksimum basınç</b>	500 pisg
<b>Tepki Süresi</b>	1 saniye
<b>Ağırlık (güç kaynağı ile)</b>	1,35 kg

**EK AÇIKLAMALAR G.**

**BİYOGAZ ANALİZÖRÜNÜN KALİBRASYON SERTİFİKASI**

# CERTIFICATION OF CALIBRATION



ISSUED BY: GEOTECH LABORATORY  
Date Of Calibration: 6 May, 2010  
Certificate Number: GA10933\_2/5544



No. 4533

Page 1 of 2 Pages

Approved by Signatory

## GEOTECHNICAL INSTRUMENTS

Sovereign House, Queensway, Leamington Spa, Warwickshire, CV31 3JR United Kingdom  
Tel: +44 (0) 1926 338111 Fax: +44 (0) 1926 338110  
E-mail: [service@geotech.co.uk](mailto:service@geotech.co.uk) Web site: [www.geotech.co.uk](http://www.geotech.co.uk)

Dawn Hemings  
Laboratory Inspection

**Customer:** Geotechnical Instruments (UK) Ltd

Sovereign House  
Queensway  
Leamington Spa  
Warwickshire  
CV31 3JR  
UNITED KINGDOM

**Description:** Gas Analyser

**Model:** GA2000Plus

**Serial Number:** GA10933

### UKAS Accredited results:

Methane (CH <sub>4</sub> )		
Certified Gas (%)	Instrument Reading (%)	Uncertainty (%)
50.13	49.60	0.94
15.01	15.10	0.64
5.01	5.00	0.41

Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )		
Certified Gas (%)	Instrument Reading (%)	Uncertainty (%)
49.87	50.12	1.11
15.01	15.00	0.70
5.00	4.90	0.43

Oxygen (O <sub>2</sub> )		
Certified Gas (%)	Instrument Reading (%)	Uncertainty (%)
20.86	20.94	0.31

All concentrations are molar.

CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> readings recorded at: 30.6°C

O<sub>2</sub> reading recorded at: 20.5°C

Barometric Pressure: 1004mb

Method of Test: The analyser is calibrated in a temperature controlled chamber using reference gases.

*The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor of k=2, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.*

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of the United Kingdom Accreditation Service. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. Certification only applies to results shown. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

**CERTIFICATION OF CALIBRATION**  
 UKAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY NO. 4533

Certificate Number  
 GA10933\_2/5544  
 Page 2 of 2 Pages

**Non-UKAS Accredited results:**

Barometer (mb)	
Reference	Reading
1004mb	1004mb

Additional Gas Cells		
Gas	Certified Gas (ppm)	Instrument Reading (ppm)
H2	999	LOW
CO	506	505.3
H2S	50.7	51.1

Internal Flow		
Normal (l/hr)	Applied (l/hr)	Measure
5	5	5.1
10	10	10

End of Certificate





**EK AÇIKLAMALAR Ğ.**

**BUJİ ATEŞLEMELİ MOTOR-JENERATÖR SETİNİN TEKNİK  
ÖZELLİKLERİ**

<b>Gaz Motoru</b>	Motor	Weifang Haitai HT4100D
	Motor Tipi	4 Zamanlı
	Soğutma Şekli	Su Soğutmalı
	Ateşleme	Elektronik Ateşleme
	Ateşleme Sırası	1-3-4-2
	Nominal Devir	1500 rpm
	Silindir Sayısı	4
	Silindir Çapı	100 mm
	Stork	115 mm
	Sıkıştırma Oranı	11:1
	Hava Besleme Türü	Doğal Emiş
	Gaz Karışım Formu	Yanma Öncesi Karıştırma
	Güç	25kW
<b>Alternatör</b>	Marka	Shanghai Stamford
	Anma Gücü	10kW
	Nominal Gerilim	380/220V
	Anma Akımı	18,9A
	Nominal Devir	1500 rpm
	Frekans	50 Hz
	Voltaj Düzenleme Modu	Otomatik
	Kontrol Sistem Modeli	GM2011



**EK AÇIKLAMALAR H.**

**DATA KARTININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ**

<b>Marka</b>	Advantech
<b>Model</b>	USB-4716-AE
<b>Kanal Sayısı</b>	16
<b>Çözünürlük</b>	16 bits
<b>Maksimum Örnekleme Sayısı</b>	200 kS/s (USB 2.0 ile)
<b>Aşırı Gerilim Koruması</b>	30 Vp-p
<b>Giriş Empedansı</b>	1 GW
<b>Hassasiyet</b>	Yaklaşık $\pm 1$ LSB
<b>Bağlantı</b>	USB 2,0
<b>Boyutlar</b>	132 x 80 x 32 mm
<b>Çalışma Sıcaklığı</b>	0~60°C
<b>Depolama Sıcaklığı</b>	-20~70°C
<b>Güç Tüketimi</b>	5V @ 360mA

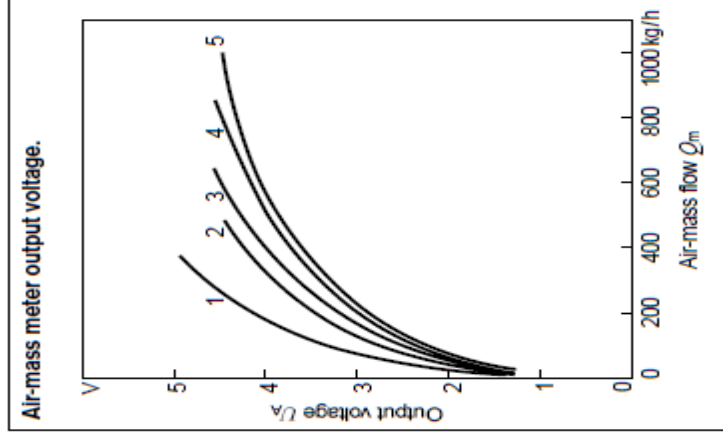


**EK AÇIKLAMALAR I.**

**KULLANILAN HAVA KÜTLE ÖLÇERİN HAVA DEBİSİ - ÇIKIŞ VOLTAJI  
GRAFİĞİ**

**Output voltage  $U_A = f(Q_m)$  of the air-mass meter**

Part number	0 280 217 123	0 280 218 019	0 280 217 531	0 280 218 008	0 280 002 421
Characteristic curve	1	2	3	4	5
$Q_m$ /kg/h	$U_A$ V	$U_A$ V	$U_A$ V	$U_A$ V	$U_A$ V
8	1.4837	1.2390	—	—	—
10	1.5819	1.3644	1.2695	—	—
15	1.7898	1.5241	1.4060	1.3395	1.2315
30	2.2739	1.8748	1.7100	1.6251	1.4758
60	2.8868	2.3710	2.1563	2.0109	1.8310
120	3.6255	2.9998	2.7522	2.5564	2.3074
250	4.4727	3.7494	3.5070	3.2655	2.9212
370	4.9406	4.1695	3.9393	3.6717	3.2874
480	—	4.4578	4.2349	3.9490	3.5461
640	—	—	4.5669	4.2600	3.8432
850	—	—	—	4.5727	4.1499
1000	—	—	—	—	4.3312



**Temperature-dependence  $R_{\theta} = f(\theta)$  of the temperature sensor**

Temperature $\theta$	°C	-40	-30	-20	-10	±0	10	20	30	40
Resistance $R_{\theta}$	kΩ	39.26	22.96	13.85	8.609	5.499	3.604	2.420	1.662	1.166
Temperature $\theta$	°C	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Resistance $R_{\theta}$	Ω	835	609	452	340	261	202	159	127	102

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa KARAGÖZ 1987 yılında İstanbul'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2003 yılında Paşabahçe Ferit İnal Liselisinden mezun oldu. 2004 yılında Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2008 yılında bölüm üçüncülüğü derecesi ile mezun oldu. Aynı yıl Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsünde yüksek lisansa başladı ve Haziran 2010'da yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Doktora Eğitimine başladı. 2013-2015 yılları arasında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini tamamladı. 2011 yılından bu yana Karabük Üniversitesinde TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu ve Enerji Çevre Teknolojileri Biriminde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Araştırmacı olarak, üniversite-sanayi işbirliği kapsamında birçok projede görev almıştır.

### Adres Bilgileri

Adres : Karabük Üniversitesi  
TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK

E-posta : mustafakaragoz@karabuk.edu.tr