

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**BİYOGAZIN ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL
MOTORUNDA ANA YAKIT OLARAK
KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Emre AYTAV

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Günnur KOÇAR

Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 12.01.2018

Bornova-İZMİR

2018

Emre AYTAV tarafından doktora tezi olarak sunulan “Biyogazın çift yakıtlı bir dizel motorunda ana yakıt olarak kullanımının deneysel incelenmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 12.01.2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Prof.Dr. Günnur KOÇAR

Raportör Üye : Prof.Dr. Mustafa ACAROĞLU

Üye : Prof.Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU

Üye : Yrd.Doç.Dr. Ahmet ERYAŞAR

Üye : Yrd.Doç.Dr. Mehmet Soner ÇELİKTAŞ

İmza



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Biyogazın çift yakıtlı bir dizel motorunda ana yakıt olarak kullanımının deneysel incelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

12 / 01 / 2018


Emre AYTAN



ÖZET**BİYOGAZIN ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL MOTORUNDA ANA YAKIT OLARAK KULLANIMININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

AYTAV, Emre

Doktora Tezi, Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Günnur KOÇAR

12 Ocak 2018, 213 sayfa

Bu doktora tezi çalışmasında, biyogazın dizel motorlarında çift yakıt sistemi ile kullanımının motor performans ve emisyonları ile motor titreşimlerine etkileri doğalgaz ile mukayeseli olarak incelenmiştir. Ayrıca, biyogazın içeriğindeki H_2S 'in yanma reaksiyonları neticesinde motor yağında meydana getireceği muhtemel bozulmalar da değerlendirmeye dâhil edilmiştir.

Bu maksatla 2,5 litrelik bir hacme sahip sabit devirli, doğal emişli ve direk püskürtmeli bir dizel motorunun, gaz yakıtların da çevrime dâhil edilebileceği çift yakıt sistemine dönüşümü yapılmıştır. Testler 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW ve 25 kW'lık yük kademelerinde ve 1500 min^{-1} sabit devirde gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncelikle konvansiyonel dizel yakıtı ile tek yakıtlı çalışma koşulunda gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise sırasıyla doğalgaz/dizel ve biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma şartlarında testler tekrarlanmıştır. Testler sonucunda, biyogazın ana yakıt olarak kullanıldığı tüm yük kademelerinde titreşim miktarının azaldığı, gürültü emisyon değerlerinin yaklaşık % 3,5 oranında düşürüldüğü görülmüştür. Yakıt değişimine bağlı olarak motor silindir bloğu, silindir kapağı, egzoz ve emme manifoldu parça sıcaklıklarında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Biyogazın içeriğindeki CO_2 gazı sayesinde egzoz gaz sıcaklığının düşük olduğu görülmüştür. Motor emisyon değerleri açısından yaklaşıldığında, NO_x emisyonunda % 50'ye ulaşan bir düşüş meydana gelirken, CO emisyonunun tüm motor yüklerinde arttığı tespit edilmiştir. Enerji tüketim maliyetinde biyogazlı sistemin, diğer yakıt tiplerine göre daha ekonomik olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar sözcükler: Çift yakıt sistemi, biyogaz ve dizel motorlar.



ABSTRACT**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF USE AS A MAJOR FUEL
IN A DUAL FUEL DIESEL ENGINE OF BIOGAS**

AYTAV, Emre

Ph.D. in Solar Energy

Supervisor: Prof.Dr. Günnur KOÇAR

12 January 2018, 213 pages

In this study, the effects of biogas on engine performance and emissions and engine vibrations of diesel engines with dual fuel system were investigated in comparison with natural gas. It has also been included in evaluating the deformation of the engine oil due to hydrogen sulfide combustion reactions.

For this purpose, a constant speed, naturally aspirated and direct injection diesel engine with volume of 2,5 liter has been converted into a dual fuel system that can be included in gas fuels. The tests were carried out at load stages of 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW and 25 kW and constant speed of 1500 min⁻¹. The experiments were first performed in a single operation condition of the conventional diesel fuel. Subsequently, tests were repeated under natural gas/diesel and biogas/diesel dual fuel operation conditions respectively. As a result of the tests, it was seen that the vibration amount decreased, the noise emission values were reduced by amount 3,5 % in all stages where biogas was used as the main fuel. Depending on fuel or operation system change, there is not significant change was observed in cylinder block, cylinder heat, exhaust and intake manifold temperature. The exhaust gas temperature is measured to be lower because of the CO₂ content in the biogas. When approaching from the point view of engine emission values, it was determined that the CO emission increased at all engine loads while a decrease of 50 % in NO_x emission occurred. At the cost of energy consumption, the biogas system is found to be more economical than other fuel types.

Keywords: Dual fuel system, biogas and diesel engines.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, planlama, araştırma, yürütme konularında benden desteğini hiç esirgemeyen, tecrübesi ve bilgisi ile yolumu çizmemde yardımcı olan tez danışmanım sayın Prof.Dr. Günnur KOÇAR'a ve tez izleme sürecinde çalışmalarımın şekillenmesinde göstermiş oldukları katkılarından dolayı tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof.Dr. Mustafa ACAROĞLU ve Yrd.Doç.Dr. Ahmet ERYAŞAR'a teşekkür ederim.

Deney ortamını oluşturan, ihtiyaç duyduğum tüm ekipman ve malzemelerin teminine yönelik kaynak yaratan ve benim için tüm imkânlarını seferber eden başta sayın Abdülhalik Emre TEKSAN olmak üzere tüm TEKSAN Jeneratör ailesine,

Tez çalışmam esnasındaki teknik desteklerinden dolayı Millî Savunma Üniversitesi Rektörlüğü personeli Doç.Dr.Öğ.Bnb. Alpaslan ATMANLI'ya, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünden Doç.Dr. Hamit YILMAZ'a, manevi desteklerini asla unutamayacağım Tolga TÜRKÖZ ve Mehmet ÖZER'e,

Tez çalışmam süresince her türlü desteği ve yardımı benden esirgemeyen Dr. Asiye Gül BAYRAKÇI, Dr. Özben ERSÖZ ve Arş.Gör. Şefik ARICI'ya,

Bu meşakkatli yolda büyük bir sabır ve fedakârlık gösteren, hep yanı başımda olan değerli eşim Gökçen ve biricik oğlum Kayra'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	8
2.1 Biyogaz Enerjisi.....	8
2.1.1 Biyogaz ve biyokimyasal süreç	8
2.1.2 Biyogaz üretiminde kullanılan materyaller	12
2.1.3 Biyogaz kullanım alanları.....	14
2.1.4 Biyogazın teorik yanma denklemi	17
2.1.5 Biyogazın yanma özelliklerine ilişkin tarihsel süreç	21
2.2 Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı.....	23
2.2.1 Gaz motorları	26

2.2.2	Biyogazın benzin motorlarında kullanımı.....	27
2.2.3	Biyogazın dizel motorlarda kullanımı.....	28
2.2.3.1	Dizel motorunun gaz motoruna dönüştürülmesi.....	28
2.2.3.2	Biyogazın çift yakıt sistemi ile kullanımı	31
3.	ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	39
3.1	Biyogazın Motorlarda Tek Yakıt Olarak Kullanımı	39
3.2	Biyogazın Çift Yakıtlı Motorlarda Kullanılması.....	47
4.	MATERYAL VE METOD.....	77
4.1	Materyal.....	78
4.1.1	Deney motoru.....	78
4.1.2	Alternatör	79
4.1.3	Yük bankası.....	81
4.1.4	Baca gazı emisyon cihazı.....	81
4.1.5	Gürültü emisyonu ölçüm cihazı	82
4.1.6	Termal kamera	83
4.1.7	Sismograf (Titreşim ölçüm cihazı)	84
4.1.8	Gaz sayacı	86

4.1.9	Hassas terazi	87
4.1.10	Mikser düzeneği.....	88
4.1.11	Pilot dizel yakıtı.....	89
4.1.12	Doğalgaz özellikleri.....	89
4.1.13	Özel karışım biyogaz	90
4.1.14	Kullanılan yağ numuneleri	91
4.2	Metot	92
4.2.1	Doğalgaz sayaç düzeltme katsayısı (K).....	92
4.2.2	Doğalgaz ve biyogazın wobbe indeksi (I_w)	94
4.2.3	Sıvı yakıt ölçümü ve özgül yakıt tüketimi.....	95
4.2.4	Özgül enerji tüketimi	95
4.2.5	Efektif verim.....	96
4.2.6	Yakıt değişim oranı hesabı	96
4.2.7	Yakıt eşdeğerlik oranı.....	97
4.2.8	Gürültü emisyonu ölçümü	98
4.2.9	Termal ölçümler.....	98
4.2.10	Titreşim testinin yapılışı	98

4.2.11	Yağ numuneleri ve dört bilye testi	102
4.2.12	Motor yataklarının uzun süreli testleri	104
4.2.13	Özgöl enerji maliyeti.....	105
4.2.14	Deneyin yapılışı	108
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	110
5.1	Dört Bilye Testi ve Yatak Malzemelerine Etkileri.....	110
5.2	Titreşim testlerinin incelenmesi	117
5.3	Gürültü emisyonu ve etkileri.....	125
5.4	Yakıt değişim oranı	127
5.5	Motor parçalarının termal olarak incelenmesi.....	129
5.6	Egzoz gaz sıcaklığının incelenmesi.....	132
5.7	Özgöl yakıt ve özgöl enerji tüketimlerinin incelenmesi.....	133
5.8	Enerji maliyeti ve özgöl enerji tüketim maliyeti	136
5.9	Motor efektif veriminin incelenmesi	138
5.10	Yakıt eşdeğerlik oranının incelenmesi.....	141
5.11	Egzoz emisyonlarının incelenmesi	142
5.12	Deney düzeneğinin belirsizliği	148

6. SONUÇ VE ÖNERİLER	151
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	160
ÖZGEÇMİŞ	179
EKLER	180



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Biyogazın motorlarda kullanımına ilişkin yapılan çalışma.	6
Şekil 1.2 Biyogaz ve motorlara ilişkin çalışmaların ÷lkere dağılımı.	7
Şekil 2.1 Örnekle biyogaz üretim tesisi.	8
Şekil 2.2 Anaerobik akış şeması.	10
Şekil 2.3 Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu.	11
Şekil 2.4 Biyogaz mikro türbini.	16
Şekil 2.5 Gaz yakıtların alev yapısı.	18
Şekil 2.6 Biyogaz ve doğalgazın alev yapılarının karşılaştırılması.	18
Şekil 2.7 Siloksanların motor parçaları üzerine etkileri.	21
Şekil 2.8 Yanma odası hacminin genişletilmesi.	29
Şekil 2.9 Lambda sensörünün montajı.	30
Şekil 2.10 Sistemin genel görünüşü.	30
Şekil 2.11 Çift ve tek yakıt sistemlerinin genel anlamdaki kıyaslaması.	31
Şekil 2.12 Gaz/dizel çift yakıtı dönüşüm şeması.	32
Şekil 2.13 Çift memeye sahip gaz/dizel çift yakıt motor enjektörü.	34
Şekil 2.14 Homojen ve heterojen yanma prosesleri.	34

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.15 Dizel/gaz çift yakıtlı motorların çevrimi.	35
Şekil 2.16 Dizel yakıtın hava ile teması.	36
Şekil 2.17 Gaz/dizel çift yakıtlı motorlarda yanma süreci.	37
Şekil 2.18 Çift yakıtlı motorlarda ısı salınım oranı.	38
Şekil 3.1. Normal ve kalıp yerleştirilmiş subap görünümü.	41
Şekil 3.2 Yanma odası içerisinde karbon ve nem oluşumu.	53
Şekil 3.3 Pilot yakıt miktarı ve iğne hareket miktarları.	73
Şekil 3.4 Püskürtme odası ve temel çalışma düzeni.	73
Şekil 4.1 Deney düzeneğinin genel görünümü.	77
Şekil 4.2 Deney ortamı.	78
Şekil 4.3 Deney düzeneğinin şematik görünümü.	78
Şekil 4.4 Deney Motoru.	79
Şekil 4.5 Alternatör genel görünümü.	80
Şekil 4.6 Alternatör verim grafiği.	80
Şekil 4.7 Yük bankası kontrol paneli.	81
Şekil 4.8 Baca gazı ölçüm cihazı.	82

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.9 Ses ölçüm cihazı.	83
Şekil 4.10 Termal kamera ve örnek görüntü.	84
Şekil 4.11 Sismograf düzeneğinin genel görünümü ve akselerometre sensörü.	85
Şekil 4.12 MMF KS80C model titreşim sensörü genleşme eğrisi.	85
Şekil 4.13 G6 ve G4 model körüklü gaz sayaçlarının genel görünümleri.	87
Şekil 4.14 Sıvı yakıt ölçüm düzeneği.	87
Şekil 4.15 Impco CA 55-5M-9 model mikser ve montajı.	88
Şekil 4.16 Doktora tez çalışmasının kapsamı ve içeriği.	92
Şekil 4.17 OriginPro 8.5 programı FFT analiz görüntüsü.	102
Şekil 4.18 Dört bilye testi şeması.	103
Şekil 4.19 Dört bilye düzeneği.	103
Şekil 5.1 Sülfürik asidin yağ numunelerine etkileri.	110
Şekil 5.2 Bakır çubuk örnekleri.	112
Şekil 5.3 Renk skalası.	112
Şekil 5.4 1500 saatlik süresince H ₂ S değişimi.	114
Şekil 5.5 Turbo yataklarının kullanım sonrası görünümleri.	115

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.6 Saha çalışmalarından alınan neticeler.	117
Şekil 5.7 5 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.	120
Şekil 5.8 10 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.	120
Şekil 5.9 15 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.	121
Şekil 5.10 20 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.	122
Şekil 5.11 25 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.	123
Şekil 5.12 Gürültü emisyonunun motor yüküne bağlı olarak değişimi.	126
Şekil 5.13 Çift yakıt sistemlerine bağlı olarak yakıt değişim oranları.	128
Şekil 5.14 Silindir kapağı sıcaklığının yüke ve yakıta göre değişimi.	130
Şekil 5.15 Silindir bloğunun sıcaklık değişimi.	131
Şekil 5.16 Egzoz gaz sıcaklığının motor yüküne bağlı değişimi.	132
Şekil 5.17 Özgül yakıt tüketiminin motor yüküne bağlı olarak değişimi.	134
Şekil 5.18 Özgül enerji tüketiminin motor yüküne bağlı değişimi.	135
Şekil 5.19 Saatlik tüketim maliyetlerinin değişimi.	137
Şekil 5.20 Özgül enerji tüketim maliyeti.	138
Şekil 5.21 Motor efektif veriminin değişimi.	139

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

Şekil..... Sayfa

Şekil 5.22 Yakıt eşdeğerlik oranının motor yüküne bağlı olarak değişimi.....141

Şekil 5.23 CO emisyonunun motor yüküne bağlı olarak değişimi.143

Şekil 5.24 NO_x emisyonunun motor yüküne ve yakıt tipine göre değişimi.....145

Şekil 5.25 CO₂ emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi.147



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 Dünya enerji üretim projeksiyonu.	2
Çizelge 1.2 Dünya toplam CO ₂ emisyonu üretimi.	3
Çizelge 2.1 Çeşitli yakıtların özellikleri.	9
Çizelge 2.2 Çeşitli materyallerin biyogaz özellikleri	13
Çizelge 2.3 Bekleme süresinde atıkların gaz miktarlarındaki değişimler.	13
Çizelge 2.4 Gaz yakıtların wobbe indeksi değerleri.	25
Çizelge 3.1 Deneyde kullanılan gazın özellikleri.	43
Çizelge 3.2 Deneyde kullanılan gazların yakıt özellikleri.....	44
Çizelge 3.3 Çeşitli ülkelerdeki biyogazın yakıt standartları.	46
Çizelge 3.4 Çiftlikte üretilen biyogazın özellikleri.....	48
Çizelge 3.5 Deney yakıtlarının genel özellikleri.	55
Çizelge 3.6 Biyogaz bileşenleri.	57
Çizelge 3.7 Dizel ve biyogazın özellikleri.....	60
Çizelge 3.8 Biyogazın kimyasal bileşimi ve yakıt özellikleri	63
Çizelge 3.9 LPG Kompozisyonları ile oluşturulan yakıt türleri.	69
Çizelge 3.10 Saflaştırma işlemi sonrasında elde edilen biyogazın içeriği.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ (devamı)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 Deney motoru teknik özellikleri.	79
Çizelge 4.2 Alternatör teknik verileri.	80
Çizelge 4.3 Ölçümü yapılabilen gazlar ve ölçüm değerleri.	82
Çizelge 4.4 Ses ölçüm cihazı teknik verileri.	83
Çizelge 4.5 Termal kameranın teknik özellikleri.	84
Çizelge 4.6 Piezoelektik titreşim sensörü teknik özellikleri.	86
Çizelge 4.7 Körüklü tip sayaçların özellikleri.	86
Çizelge 4.8 Mikser genel özellikleri.	89
Çizelge 4.9 Konvansiyonel dizel yakıtının kimyasal özellikleri.	89
Çizelge 4.10 Doğalgazın özellikleri.	90
Çizelge 4.11 Biyogazın özellikleri.	90
Çizelge 4.12 1 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.	91
Çizelge 4.13 2 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.	91
Çizelge 4.14 3 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.	91
Çizelge 4.15 4 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.	92
Çizelge 5.1 Dört Bilye deneyi aşını miktarları.	110

ÇİZELGELER DİZİNİ (devamı)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.2 Ölçü aletlerinin hassasiyet değerleri.....	150
Çizelge 5.3 Hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik değerleri.....	150



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
K	Sayaç düzeltme katsayısı
V_R	Reaktör hacmi
I_W	Wobbe indeksi
λ	Lambda (Hava Fazlalık Katsayısı)
m_d	Düzeltilmiş hacim
m_s	Sayaçtan ölçülen hacim
P	Basınç
P_a	Aylık şehir gaz giriş istasyonu basınç değeri
P_s	Sayaç ölçüm basıncı
P_r	Referans şartlardaki basınç değeri
T_r	Referans şartlardaki sıcaklık değeri
T	Sıcaklık
Z_r/Z	Sıkıştırılabilirlik oranı
Z_r	Referans şartlardaki sıkıştırılabilirlik
H_n	Gaz yakıtların genel alt ısı değeri
d	Gaz yakıt özgül ağırlığı
b_e	Özgül yakıt tüketimi
N_e	Efektif motor gücü
B	Saatlik yakıt tüketimi
η_e	Efektif verim

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
Z	Yakıt değişim oranı
$\dot{m}_D$	Pilot dizel yakıtı kütleli debisi
$\dot{m}_G$	Ana gaz yakıtı kütleli debisi
$\dot{m}_y$	Birim yakıt kütlesi
$\dot{m}_h$	Birim hava kütlesi
$\emptyset$	Yakıt eşdeğerlik oranı
n	Motor devri
R	Gaz sabiti
v	Hacim
p	Basınç

Kısaltmalar

TEP	Ton eşdeğer petrol
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol
OECD	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
AB	Avrupa Birliği
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
PETDER	Petrol Sanayi Derneği
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
AÖN	Alt ölü nokta

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
ÜÖN	Üst ölü nokta
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
EGR	Egzoz gaz geri dönüşümü
DME	Dimetil eter
DC	Doğru akım
LPG	Likit petrol gazı
CNG	Sıkıştırılmış doğalgaz
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü
YO	Yükleme oranı
TK	Toplam katı madde
HBS	Hidrolik bekletme süresi
UK	Uçucu katı madde
GBM	Günlük besleme miktarı
ATDC	Üst ölü noktadan sonra
HRR	Isı salınım oranı
HFK	Hava fazlalık katsayısı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ISO	Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı
SAE	Otomotiv Mühendisleri Derneği
ÖET	Özgül enerji tüketimi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
ÖYT	Özgöl yakıt tüketimi
LHV _D	Dizel yakıtı alt ısı değeri
LHV _G	Gaz yakıtı alt ısı değeri
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
RMS	İvme genlik değeri
TBN	Toplam baz sayısı
ppm	Milyonda bir parçacık
KMA	Krank mili açısı
H/Y Oranı	Hava/Yakıt oranı
CH ₄	Metan gazı
H ₂ S	Hidrojen Sülfür
(H ₃ Si) ₂ O	Siloksanlar
NH ₃	Amonyum
CO ₂	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
NO _x	Azotoksit
HC	Hidrokarbon
SO ₂	Kükürtdioksit
H ₂ O	Su

xxx



1. GİRİŞ

Dünya nüfusu, yıllık ortalama 70 milyon kişi artış göstermektedir. Bu değer, nüfusu 7,5 milyara ulaşan bir dünya için yüzde bir oranında olduğu düşünülüp küçümsenecek olsa da, her yıl bir Türkiye kadar daha insanın ihtiyaçlarını karşılamak gerektiği gerçeğini değiştiremez. Küreselleşen dünyada, bireysel ihtiyaçlar her geçen gün katlanarak artmaktadır. Bu kişisel ihtiyaçlara cevap verebilmek için ise teknolojiyi geliştirmek ve çoğaltmak gerekirken, tüm sistemin ihtiyacı olan enerjiyi de mutlak suretle sağlamak mecburiyeti bulunmaktadır. 1990 yılında kişi başı enerji tüketimi ortalama 1,5 TEP iken nüfusun ve teknolojinin gelişmesi ile 2010 yılında bu değer 1,7 TEP olmuştur (Anonim 1, 2012).

Çizelge 1.1’de verilen dünya enerji üretimi değerlerine bakıldığında, en yüksek pay petrole aittir (BP, 2014). Biyoyakıtların genel enerji üretimi içerisindeki payı çok küçük olsa da 1990-2012 yılları arasında % 0,09’dan, % 0,48’e yükselmiştir. Biyoyakıt kaynaklı enerji üretimi 22 yılda, % 850 oranında artış göstermiştir. Biyoyakıtların 45 yıllık peryotta üretiminin % 3211,3 oranında artmasının beklenmesi, gelecek enerji üretim politikalarında ne kadar önemli bir yere sahip olacağının görülmesi açısından önemlidir.

Enerji konusunda dışa bağımlı olan Avrupa Birliği, OECD üyesi ülkeler, Amerika Birleşik Devletleri, Çin Halk Cumhuriyeti ve Avrupa Birliği üyesi olmayan Avrupa ülkeleri dünya nüfusunun yaklaşık olarak yarısını temsil etmektedir. 2012 yılı enerji tüketim değerlerine bakıldığında, OECD üyesi ülkeler 3924,6 MTEP enerji üretimi sağlarken, 5488,9 MTEP enerji tüketmiştir. 1564,3 MTEP’lik enerji açığını diğer üretici ülkelerden sağlamıştır. Avrupa Birliği üyesi ülkeler, aynı yıl 745,9 MTEP’lik enerji üretimine karşılık 1673,4 MTEP enerji tüketmiştir. Yine ABD göz önüne alındığında, 2012 yılında toplam enerji üretim/tüketim farkı -354,3 MTEP olmuştur (BP, 2014).

Çizelge 1.1 Dünya enerji üretim projeksiyonu (BP Statistical Review, Haziran 2014).

Enerji üretimi*	Yıllar					
MTEP ^	1990	2000	2010	2020	2030	2035
Toplam petrol üretimi^	3175,432	3619,779	3977,79	4367,345	4714,867	4815,978
Toplam doğalgaz üretimi	1790,131	2176,947	2879,332	3685,851	4297,813	4646,954
Toplam kömür üretimi	2254,451	2293,444	3482,548	4382,01	4679,259	4770,431
Toplam nükleer enerji üretimi	453,081	584,334	626,363	704,294	838,867	859,915
Toplam hidroelektrik üretimi	489,866	602,364	782,127	963,927	1154,789	1245,824
Toplam biyoyakıt üretimi	7,094	9,176	59,464	78,865	98,125	116,215
Toplam yenilenebilir enerji üretimi	28,492	51,515	168,595	505,477	918,373	1118,918
Toplam enerji üretimi	8198,5	9337,6	11976,2	14687,8	16702,1	17574,2
OECD üyesi #	3442,2	3841,9	3888,6	4529,6	4863,0	4959,8
OECD üyesi olmayan	4756,4	5495,6	8087,6	10158,1	11839,1	12614,5
Avrupa Birliği #	898,0	894,8	780,1	723,3	706,4	710,0
Avrupa	1095,4	1194,3	1080,3	1029,4	1019,6	1016,9
Eski Sovyetler Birliği †	1672,1	1279,5	1687,7	1918,5	2100,7	2221,1
Amerika Birleşim Devletleri	1664,4	1676,4	1749,8	2169,5	2340,0	2295,3
Çin	720,7	934,0	2066,2	3073,3	3560,3	3736,8
Hindistan	153,4	213,8	337,2	455,0	626,8	729,4

Teknolojik anlamda çok gelişmiş ülkeler bile taşıma, imalat ve enerji hizmetlerinin dağıtımında kullanmak üzere ihtiyacı olan enerji gereksinimlerini karşılayabilme açısından dış kaynaklara giderek daha bağımlı hale gelmektedir. Bu kaynakların bulunduğu ülke insanları ise genellikle gelişmiş ülkelerden daha farklı koşullara sahip olduklarından, enerjinin büyük bir bölümünü de farklı şekillerde kullanmaktadır. Bu bağlamda, enerjide dış kaynak kullanım seviyesi toplumların yaşam biçimlerine bağlı olarak iklim, temizlik, trafik yoğunluğu, kirlilik, üretim ve sera gazı emisyonları şeklinde farklılaşmaktadır.

Petrol varil fiyatlarındaki artışlar ve/veya fiyat dalgalanmaları, dünya genelinde gelişen olumsuzluklar neticesinde meydana gelmektedir (BP, 2011; IEA, 2014). 1972 yılında spot ham petrolün varil fiyatı 2,5-3,0 dolar seviyesindeyken, 1980 yılına gelindiğinde ise 35 dolara yükselmiştir (IEA, 2010; Finley, 2012). 2000'li yıllarda bu değerin 150 dolara ulaştığı, yakın tarihimizde görülmüştür. Bu nedenle ülkeler mevcut ekonomilerini koruyabilmek, girdi ve çıktıları kontrol altına alabilmek için kendi enerji kaynakları olan yenilenebilir enerjiyi geliştirme ve kullanma yolunu seçmeye başlamıştır.

Enerji üretim/tüketim değerleri ve enerji fiyatlarındaki dalgalanmanın dışında enerji kullanımı sonucunda açığa çıkan emisyon değerlerinin çevresel, iklimsel ve hayati etkileri de bulunmaktadır. Fosil yakıt kullanımı, küresel olarak atmosfere en çok salınan ve küresel ısınmayı artırıcı etkisi olan CO₂ emisyonunu çok yönlü olarak etkilemektedir (WEC, 2010; U.S.EIA, 2011). Çizelge 1.2’de dünya toplam CO₂ emisyonu üretimi 1971 yılında 14.079,8 milyon ton iken, 2011 yılına gelindiğinde bu değer 31.342,3 milyon tona çıkmıştır (OECD, 1999; WEC, 2009; WEC, 2011; IEA Statistics, 2013; U.S. EIA, 2014).

Çizelge 1.2 Dünya toplam CO₂ emisyonu üretimi.

Milyon Ton CO ₂	Yıllar						
	1971	1980	1990	2000	2009	2011	% değişim 90-11
Dünya	14079,8	18061	20988,7	23758,6	28966,4	31342,3	49,3
OECD üyesi olmayan	4197,6	6802,3	9219,3	10297,1	15921,6	17887,9	94
OECD toplam	9370,1	10710,4	11150,7	12625,1	12021,1	12340,8	10,7
OECD Amerika	4747,8	5321,8	5593,2	6629,8	6169,7	6325,6	13,1
OECD Asya okyanus ülkeleri	983,1	1249,1	1606,7	2038,4	2104	2268,1	41,2
OECD Avrupa	3638,2	4139,5	3950,8	3956,9	3747,4	3747,1	-5,2
OECD olmayan Avrupa/Avrasya	2243,2	3414,8	3985,9	2410,1	2453,7	2742,8	-31,2
Afrika	248,7	401,9	544,5	680,5	927,8	967,8	77,7
Asya	434,1	711,1	1278,6	2132,2	3214,8	3484	172,5
Çin	824,7	1440	2277,7	3350	6838,6	7999,6	251,2
OECD üyesi olmayan Amerika	347,1	527,8	576,9	814,8	998,5	1086,8	88,4
Orta Doğu	99,8	306,7	555,7	909,6	1488,1	1606,9	189,1

Sektörel CO₂ emisyonun dağılımı incelendiğinde, 2014 yılında toplam çevreye salınan CO₂ emisyonunun % 25’inin ısı ve elektrik üretimi, % 14’ünün ise ulaşım sektörü kaynaklı olduğu görülmektedir (Intergovernmental Panel, 2014). İçten yanmalı motor kaynaklı olarak da değerlendirilebilecek olan bu değer, diğer tüm sektörlerin önünde yer almaktadır. Diğer sektörlerin dağılımı incelendiğinde; endüstride % 21, inşaat sektöründe % 6, tarımsal ve diğer orman ürünleri kaynaklı CO₂ emisyon salınım oranı ise % 24 olarak kaydedilmiştir (IEA CO₂, 2011; IEA Statistics, 2011).

Yakıtların büyük bir kısmının içten yanmalı motorlarda kullanılmakta olduğu düşünüldüğünde, yapılacak olan çalışmaların yenilenebilir yakıtlar

üzerinde olması gerektiği açıktır. Sadece enerji ihtiyacı olarak değil, çevreye duyarlılık bakımından da temiz yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. ABD ve Çin gibi ülkeler, büyük oranda ithal ettikleri petrole olan bağımlılıklarını azaltmak ve alternatif kaynaklarla birlikte enerji arzının güvenliğini sağlamak amacıyla biyoyakıt üretimine ağırlık vermektedirler (Kum, 2009; Demirbaş, 2009). Tarım sektöründe istihdamın ve gelirin artırılarak kırsal kalkınmanın sağlanması amacı, başta Almanya olmak üzere diğer AB ülkelerinin biyoyakıt üretimine yönelmelerini sağlamıştır (Turpeinen, 2007).

Enerji kaynaklarının her parçasının geliştirilebilmesindeki anahtar kelime, o kaynağın kullanılabilirliğinde yatmaktadır. Yakımı esnasında açığa çıkan CO₂'yi kendi üretimleri aşamasında atmosferden yeniden çekip kullanan ve bu sayede nötr CO₂ emisyonuna sahip yakıtlar olarak da adlandırılan biyoyakıtların (biyodizel ve biyoetanol, biyogaz) önemi bu kapsamda daha da artmaktadır. AB'nin 2000 yılında kabul ettiği "Yeşil Kitap" ile 2020 yılına kadar geleneksel yakıtların % 20'sinin yenilenebilir enerjili yakıtlarla yer değiştirmesi hedeflenmiştir (European Commission, 1997; Anonim 6, 2000).

1980 sonrasında nüfusun ve sanayileşmenin hızlanması, neoliberal politikaların desteği ile Türkiye'nin daha fazla dışa açılımı söz konusu olmuştur. Bunun neticesinde de sanayi ve hizmet sektörü önem kazanmıştır. 1960'lı yıllarda petrolün toplam enerji üretimindeki payı % 8 iken, 1970'li yıllarda bu değer % 46,7 seviyesine gelmiştir. 1980'li yıllara gelindiğinde, enerji tüketimi % 4,4 artarken, enerji üretiminin ortalama artışı % 2,2'de kalmıştır (Hacısalıhoğlu, 2008; Kantörün, 2010). Türkiye'nin enerji üretimi, tüketimini karşılayamadığı için, enerji tüketiminde ithalatın payı % 70'e ulaşmıştır. Enerji talebinin tahmin edilen oranlarda artması halinde 2020 yılında ithalatın enerji tüketimindeki payı % 78'e çıkacaktır (Pamir, 2003). Günümüzde, fosil kaynakların toplam enerji tüketimindeki oranı % 90'lara ulaşmıştır. Doğalgaz ve petrol üreticisi olmayan Türkiye, doğalgaz ihtiyacının % 96'sını, petrol ihtiyacının ise % 90'ını ithalatla karşılamaktadır (Mavi Kitap, 2011). İthalata bağımlılığın yüksek olmasından dolayı, enerji güvenliği ve enerji arzının sürekliliği Türkiye için hayati öneme sahiptir (Selçuk, 2010).

Gelişen sanayi ve teknolojiye paralel olarak araç sayılarındaki artış da, hız kazanmaktadır. Kara taşıtı sayılarındaki artış incelendiğinde, son on yılda kara taşıtı sayısı % 75 oranında artış göstererek 21 milyona ulaşmıştır (TUIK, 2017). Bu duruma bağlı olarak; 2015 yılında tüketilen toplam otomotiv yakıtı (benzin, motorin ve otogaz), 33 milyon m³ olmuştur (PETDER, 2015). Enerji Bakanlığının yayınladığı 2011 Mavi Kitap verilerinde, 2020 yılı projeksiyonuna göre enerji ihtiyacının, sanayi sektörü için % 157, konut sektörü için % 64,7, ulaştırma sektörü için % 122 ve tarım sektörü için % 32,7 oranında artması öngörülmektedir (Mavi Kitap, 2011). Talep tarafında enerji verimliliği başta olmak üzere teknolojik gelişmelere paralel iyileştirmelerin; arz tarafında ise fosil yakıtlara alternatif yenilenebilir kaynakların kullanımlarının yaygınlaştırılması sağlanmalıdır.

Türkiye’de biyoyakıt üretimi ve kullanımında, mevcut enerji açığına rağmen istenilen artış geçmişten günümüze kadar sağlanamamıştır. Biyodizel ve biyoetanol gibi gıda temelli biyoyakıtların gıda güvencesinde yarattığı riskler ve bu ürünlere hammadde teşkil eden tarımsal ürünlerin, ülkenin gıda ihtiyacını bile karşılamaktan çok uzak olduğu düşünüldüğünde, bu geride kalmanın normal bir durum olduğu görülmektedir. Ülkemizin sahip olduğu tarımsal ve hayvansal potansiyele bağlı atık ve atık türevlerini değerlendirmek, gıda zincirinde yer alan hammaddeleri yakıt amaçlı kullanmaktan daha akılcı ve daha gerçekçi olacaktır.

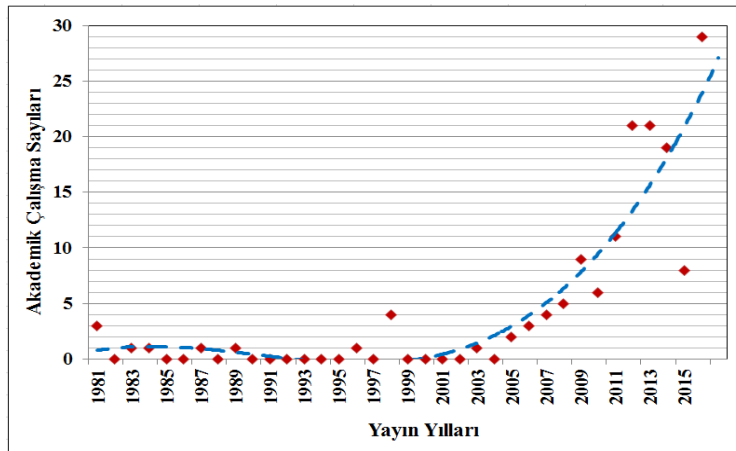
Organik maddelerin anaerobik fermentasyonu sonucunda elde edilen biyogaz, özellikleri nedeniyle doğal gaza benzeyen yanıcı bir gazdır. Özellikle ısı ve elektrik üretiminin sağlanmasındaki payı, her geçen gün artmaktadır. Biyogaz sistemleri, tüm avantajlarına ve Türkiye’nin yüksek hayvansal atık potansiyeline sahip olmasına rağmen gelişimi kısıtlı olmaktadır. Özellikle mevcut AR-GE çalışmalarının sayılarındaki yetersizlikler, konunun sadece laboratuvar boyutunda incelenmesi neticesinde ticarileşmesi için gerekli bilimsel altyapının ve cazibenin yaratılamamış olması, biyogazın geri planda kalmasının sebepleri arasında sayılabilir.

Biyogazın sahip olduğu yakıt özellikleri nedeniyle direk otomotiv yakıtı olarak kullanımı yakın gelecekte mümkün görünmese de, jeneratör ve stasyonier

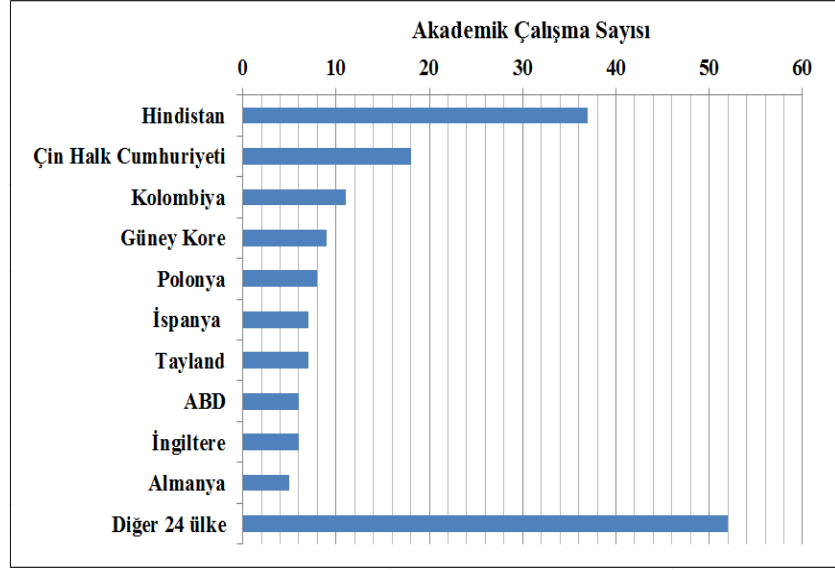
güç kaynakları ile tarım ve iş makinelerinde kullanımının mümkün olduğu düşünülmektedir. Küçük işletme ve/veya çiftliklerde elektrik ve ısı kaynağı olarak biyogaz kullanımı hem atıkların değerlendirilmesinde, hem de enerjiyi çok daha ucuza mal etmenin mümkün kılınmasında önemli bir yere sahip olacaktır. Jeneratörlerin ikame yakıt ile çalışması söz konusu olduğunda yalıtım, ısı, gürültü, sarsıntı ve emisyon gibi etkenlerde meydana gelebilecek değişimlerin ortaya çıkarılması, enerji tüketim ve maliyetlerinin belirlenmesi önem taşımaktadır.

Literatürde yapılan tarama neticesinde biyogazın motorlarda kullanımına yönelik çalışma sayıları Şekil 1.1’de gösterilirken, konunun ancak son birkaç yılda yoğun olarak araştırılmaya başlandığı görülmektedir. Yapılan çalışmaların % 72,2’sinin son 6 yılda gerçekleşmesi trendin önemli bir eğilimle artış gösterdiği ve konunun gelecekte yoğun olarak ilgi çekeceği değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, mevcut çalışmaların % 49,4’ünün Hindistan, Çin, Kolombiya, Güney Kore ve Polonya gibi enerji konusunda dışa bağımlılığı olan ülkeler tarafından gerçekleştirildiği Şekil 1.2’de görülmektedir.

Ayrıca yaygın kullanım alanı olan 25 kW’lık bir motorda söz konusu çalışmaların yapılması, konunun ticarileşmesi açısından ihtiyaç duyulacak altyapıya da destek olacağı değerlendirilmektedir. Türkiye’nin sahip olduğu biyogaz potansiyelinin elektrik/ısı üretiminde çift yakıtlı dizel motorlarla değerlendirilmesi ve özellikle kırsal kesimde yenilenebilir ve sürdürülebilir bir döngünün sağlanabilecek olması konunun önemini artırmaktadır.



Şekil 1.1 Biyogazın motorlarda kullanımına ilişkin yapılan çalışma.



Şekil 1.2 Biyogaz ve motorlara ilişkin çalışmaların ölkere dağılımı.

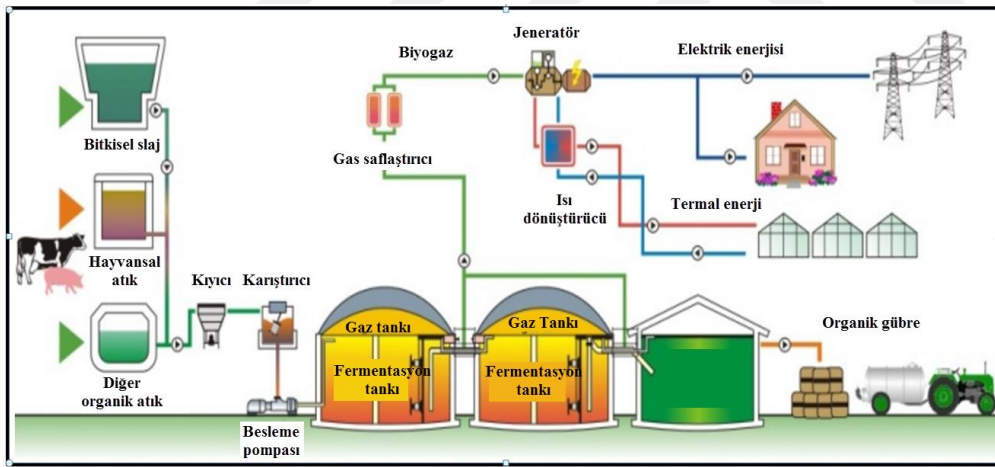
Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımına yönelik olarak, gerek ulusal gerekse uluslararası alanda yapılan çalışmaların diğer alternatif yakıtlara kıyasla az ve kapsamlarının dar olduğu tespit edilmiştir. Mevcut çalışmalarda, biyogaza yaklaşımın, emisyon ve performans kriterleri çerçevesinde sınırlı kaldığı da görülmektedir. Bir teknolojinin yaygınlaşabilmesi ve kamuoyunda kabul görebilmesi, bu kriterlerin yanı sıra o teknolojinin çok yönlü AR-GE'sine, sürdürülebilirliğine ve ekonomikliğine de bağlıdır.

Bu çalışma ile biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımına farklı bakış açıları getirilmeye çalışılmıştır. Emisyon ve performansın irdelenmesinin yanında, maliyet analizleri, uzun süreli kullanım sonucu meydana gelebilecek bozulmalar, yağ analizleri, titreşim ve gürültü emisyonları gibi literatürde eksik kalan alanlardaki boşluğun doldurulması çalışmanın temel hedefi olarak belirlenmiştir. Bu hedefler ışığında hem laboratuvar şartlarında, hem de saha çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Biyogaz Enerjisi

Anaerobik fermentasyon ile biyogaz üretimi, yenilebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yeri olan biyokütleden enerji elde etme yöntemlerinden birisidir. Tarımsal, toplumsal ve endüstriyel atık/atık su gibi çeşitli kaynaklar biyogaz sistemlerinde besleme materyali olarak kullanılabilir (Yadvika et al., 2004). Enerji bitkileri, algler, kültür bitkilerinin hasat sonrası atıkları aynı hayvansal atıklar gibi biyogaz üretiminde kullanılabilir. Biyogaz üretimi için ihtiyaç duyulan materyalin tamamen atıklardan oluşması, diğer biyoyakıtlar gibi gıda güvencesinde risk teşkil etmemesi, çevreci olması ve üretimi sonrasında açığa çıkan ürünlerin de kullanılabilmesi gibi faydaları nedeniyle biyogaz, son yıllarda büyük ilgi görmeye başlamıştır. Yaygın olarak kullanılan biyogaz tesis şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Örnek biyogaz üretim tesisi.

2.1.1 Biyogaz ve biyokimyasal süreç

Biyogaz, % 40-70 CH_4 , % 60-30 CO_2 ve diğer gazlardan (H_2S , N_2 , H_2 , CO) oluşur (Calle et al., 2007; Deublein and Steinhauser, 2008; Drapcho et al., 2008; Kaparaju et al., 2008). Metan bakterileri fermentasyon esnasında hidrojeni kullandığından biyogaz içerisinde genellikle % 1-2’den daha az bulunur. CO , biyogaz içerisinde % 1’in altında ve 10-100 ppm seviyesinde

yer almaktadır. N_2 ise genellikle % 4'ün altında bulunmaktadır. N_2 'nin mevcudiyetinin bu referans olabilecek değerin üzerinde seyretmesi, reaktör içerisine herhangi bir nedenden ötürü hava girdiğinin göstergesidir. H_2S , kullanılan materyale bağlı olarak 100-5000 ppm arasında bulunabilmektedir. Yüksek oranda reaktif bir gaz olduğundan aktarım esnasında konsantrasyonu düşme eğilimindedir (Mitzlaff, 1988; Koçar vd., 2010; Dursun ve Özdemir, 2016).

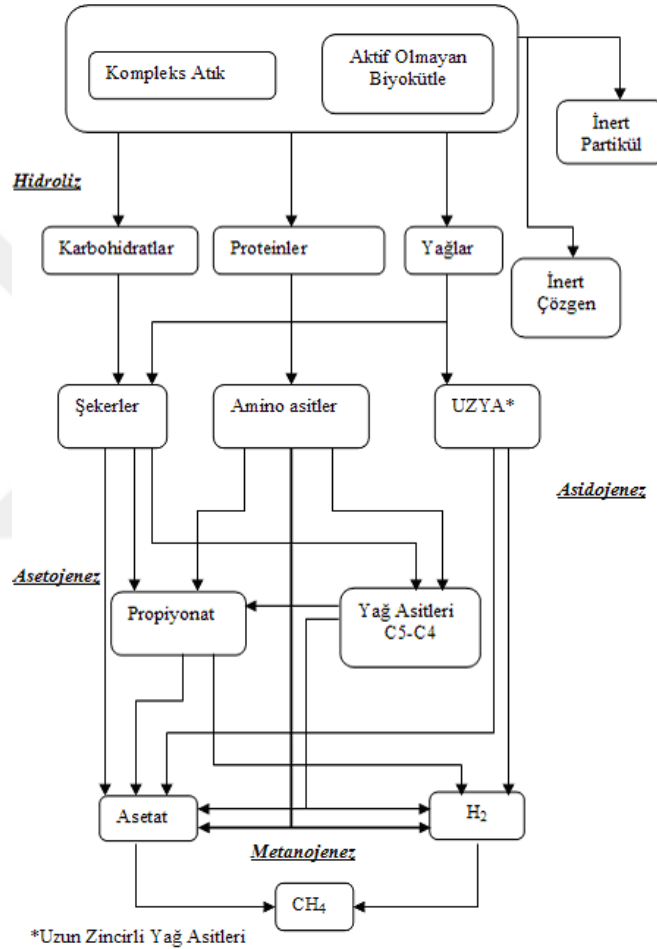
Biyogazın sahip olduğu enerji değeri içeriğindeki metan gazından kaynaklanmaktadır. Diğer tüm gazlarda olduğu gibi biyogazın özellikleri de sıcaklığa, basınca ve neme göre değişmektedir. Metan ideal bir gaz gibi davrandığından düşük basınçlarda LPG gibi kolaylıkla sıvılaştırılmaz. Biyogazın sıvılaştırma basıncı 280-350 bar civarındadır (Koçar vd., 2010). Biyogazın farklı formlardaki diğer yakıtlarla kıyaslandığı özellikler, Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli yakıtların özellikleri (Koçar vd., 2010; Pound et al., 1981).

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

Hücrelerin anaerobik solunum prensibi genel olarak, büyük ve yüksek enerjili bileşiklerin yıkılıp, daha küçük ve daha düşük enerji içeren bileşiklere çevrilmesidir. Büyük moleküllerin yıkımı ile kaybedilen enerji, organizma tarafından tutulup, metabolizmada farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Organizmaların beslenmesi konusunda karbon ve enerji gibi iki önemli nokta

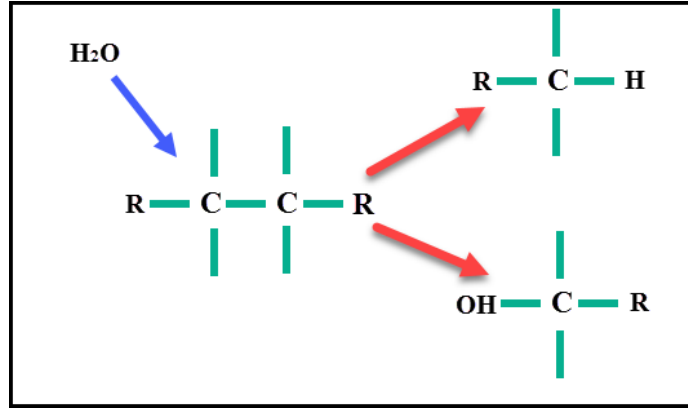
bulunmaktadır. Karbon, hücre büyümesi ve hücresel materyallerin sentezlenmesinde kullanılırken, enerji ise başta organizmaların çoğalması için olmak üzere metabolizmada harcanmaktadır. Biyogaz üretiminin mikrobiyal metabolizması hidroliz, asidojeniz, asetojeniz ve metanojeniz adı altında 4 temel başlıkta toplanmaktadır (Koçar vd., 2010; Çallı, 2012; Dursun ve Özdemir, 2016; Parawira, 2004). Şekil 2.2’de, uluslararası anaerobik modelleme grubunun önerdiği özgün anaerobik akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Anaerobik akış şeması (Koçar vd., 2010).

Hidroliz aşamasında; organik materyal, bakterilerin kolayca kullanabileceği küçük parçacıklara çevrilmektedir. Buna katılan hidrolitik bakteriler, malzemeyi biyokimyasal olarak parçalayan enzimleri serbest bırakırlar. Bu aşama sonucunda organik atıkların büyük kısmı suda çözünür hale gelmektedir (Deublein and Steinhauser, 2008; Karagiannidis, 2012). Hidroliz aşamasında gerçekleşen reaksiyon Şekil 2.3’de gösterildiği şekilde,

karbon/karbon kovalent bağının su ile reaksiyonu sonucu kırılmasıdır (Dursun ve Özdemir, 2016).



Şekil 2.3 Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu.

Hidroliz aşaması, anaerobik fermentasyonun hızını belirleyen bir basamaktır (Karlsson et al., 2014). Reaktör içine alınan materyalin metan üretimine geçmeden önce bakteriler tarafından kullanılabilecek forma dönüşmesi gerektiğinden, hidroliz süresinin uzunluğu hidrolik bekletme süresi ve beraberinde metanojenez fazına geçişi de etkilemektedir (Koçar vd., 2010; Awasume and Sathiyaraj, 2011).

Asidojenez aşaması, anaerobik yıkım basamakları arasında reaksiyonların en hızlı gerçekleştiği adımdır. Hidroliz aşamasının yıkım ürünleri olan amino asitler, basit şekerler, uzun ve kısa zincirli yağ asitleri; alkoller, organik asitler, C1-C5 (formik, propiyonik, bütirik, süksinik, laktik asit), bazı azot ve kükürt bileşikler ile asidojenez fazında asetat, CO₂ ve H₂ gibi ara metabolitlere fermente olmaktadır (Türk-Alman Biyogaz Projesi, 2011). Asetik asit konsantrasyonu, oksijensiz koşullardaki çevrimde önemli bir yere sahiptir. Şayet prosesin dengesi bozulur ise H₂ tüketimi yeterince hızlı gerçekleşemez ve bununla birlikte değişik türde alkol ve yağ asidi oluşumu artış gösterir (Koçar vd., 2010).

Asetojenez aşaması, uçucu yağ asitleri, aseton üreten bakteriler tarafından H₂ ve CO₂ açığa çıkartıldığı, anaerobik yıkım sürecinin en önemli adımıdır. Çünkü bu aşamada metanojenez için substrat sağlanmaktadır.

Metanojenler, asetik asidin iyonize formu olan asetati kullanarak metan ve CO₂ üretmektedir (Asgari et al., 2011; Çelikkaya, 2016; Wnxiu and Mengiie, 1989).

Metanojenenez aşaması, biyogaz oluşumunun son aşamasıdır. Metan oluşumunu sağlayan bakteriler yerüstünde ve sulu ortamlarda, doğal olarak çürümüş organik materyallerde, derin su volkanik yarıklarında, bataklık ve göllerin kara çamurlarında bulunmaktadır. Ayrıca, hayvan ve insan sindirim ürünlerinde, geviş getiren hayvanların rumenlerinde, geviş getirmeyen hayvanların ise jejunum denilen kalın bağırsak başlangıcında bulunmaktadır. Hidrojen kullanan metanojenler, hidrojen ve CO₂'den metan üretirken (% 30 oranında), asetoklastik metanojenler ise asetik asidi ayrıştırarak metan (% 70 oranında) oluşturmaktadır. Bu aşama reaksiyon hızını belirleyen ve kesin anaerobik şartları taşıması gereken aşamadır. Bu gruptaki bakteriler, önceki aşamalarda üreyen bakterilerden farklı olarak daha yavaş gelişmektedir (Koçar vd., 2010).

2.1.2 Biyogaz üretiminde kullanılan materyaller

Tarımsal, toplumsal, endüstriyel atık ve atık suları gibi çok çeşitli organik materyaller biyogaz üretiminde hammadde olarak kullanılabilir (Demirbaş ve Öztürk, 2005). Biyogaz üretiminde kullanılan hayvansal (sığır, at, koyun, tavuk gibi hayvanların gübreleri, mezbaha atıkları ve hayvansal ürünlerin işletmesi sırasında ortaya çıkanlar veya insan dışkısı) ve bitkisel (ince kıyılmış sap, saman, mısır atıkları, şeker pancarı yaprakları gibi bitkilerin işlenmeyen kısımları ile bitkisel ürünlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkanlar) atıklar tek başına kullanılabileceği gibi uygun oranda karıştırılarak da kullanılabilir (Yılmaz ve Atalay, 2004).

En fazla biyogaz/metan üretilen maddeler sırasıyla organik yağlar, proteinler ve karbon hidratlardır. Proteinler ve yağlar yüksek metan oranına neden olurken, şekerler gibi oksitlenen bileşiklerin fermentasyonu sonucunda düşük metan oranı elde edilir. Çeşitli organik materyallerin toplam katı madde oranı, uçucu katı madde oranı ve biyogaz verimlerine ilişkin bilgiler Çizelge

2.2’de, hayvansal atıkların ve bu atıklar ile konfermente edilen diğer atıkların biyogaz potansiyellerine ilişkin değerler ise, Çizelge .2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Çeşitli materyallerin biyogaz özellikleri (Eryaşar, 2007; Koçar vd., 2010; Luostarinen et al., 2011; Anonim 2, 2015; Marchaim, 1992).

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

Çizelge 2.3 40 gün devam eden bekleme süresinde atık ve atık karışımlarının gaz miktarlarındaki değişimler.

Atık ve Karışımları	Biyogaz Üretimi (m ³ /kg)
Sığır Atığı	0,380
Domuz Atığı	0,569
Tavuk Atığı	0,617
Kanalizasyon Suyu	0,265
Yabani Ot	0,277
Sığır + Domuz Atığı (50:50)	0,510
Sığır + Kanalizasyon Suyu (50:50)	0,407
Sığır + Yabani Ot (50:50)	0,363
Tavuk + Kanalizasyon Suyu (50:50)	0,413
Tavuk + Yabani Ot (50:50)	0,495
Kanalizasyon Suyu + Yabani Ot (50:50)	0,387

2.1.3 Biyogaz kullanım alanları

Biyogaz, genel olarak ısı ve elektrik enerjisi amaçlı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, fermentasyon sonucunda açığa çıkan artık, organik gübre olarak tarımda oldukça faydalıdır. Biyogaz yukarıdaki amaca hizmet etmek maksadıyla doğrudan yakılarak, sıcak su ve sıcak hava elde etmede, kurutmada, buhar elde ederek ısı ve güç üretiminde kullanılabilir. Biyogazın yanma özelliği bileşiminde bulunan metan gazından ileri gelmektedir. Isıtma amacıyla gaz yakıtlarla çalışan fırın ve ocaklardan yararlanılabileceği gibi, termosifon ve şofbenler de biyogazla çalıştırılarak kullanılabilir. Biyogaz, sıvılaştırılmış petrol gazı ile çalışan sobaların meme çaplarında basınç ayarlaması yapılarak kolaylıkla kullanılabilir. Biyogaz sobalarda kullanıldığında, bünyesinde bulunan H_2S gazının yanmadan ortama yayılmasını önlemek üzere bir baca sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, daha sağlıklı bir ısınma için kalorifer sistemleri tercih edilmektedir (Rai, 2005; Koçar vd., 2010; Acaroğlu, 2013; Anonim 8, 2016).

Tüm bu kullanım alanlarının yanı sıra, biyogaz çevreye karşı duyarlı bir enerji kaynağıdır. Bu yüzden gelişen koşullarda çevre kirliliğinin önlenmesinde, yeşil yakıt olarak bilinen organik madde kökenli biyogaz kullanımı daha önemlidir. Biyogaz üretimi için kullanılan ham maddeler tarım arazilerinde üretildiği için, tarımsal işletmelerde gerek sera ve mekan ısıtılmasında gerekse de tarım alet ve makine yakıtı olarak kullanılmasında fayda sağlayabilmektedir. Bu şekilde kullanılan biyogaz, işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

H_2S ve su buharı kaynaklı korozyonun önlenmesi için, çalışma sıcaklığının çığ noktası sıcaklığının üzerinde tutulması gerekmektedir. Biyogazın çığ noktası sıcaklığı $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ dir. İçeriğindeki CO_2 sabit yakımlarda Y/H oranını olumsuz etkilemektedir. Stokiyometrik oranda yanma odasına gönderilmesi çok önemlidir. H_2S ve su buharının korozyonunu engelleyebilmek için, çalışma sıcaklığının çığ noktası sıcaklığının üzerinde devam ettirilmesi gerekir. Başlangıç ve sonlandırma durumlarında yüksek

Çalışma sıcaklığına ulaşılamayacağından, biyogaz yerine propan veya doğal gaz kullanımı tavsiye edilmektedir.

Biyogazın 15000 kJ/m^3 den daha dūřuk bir enerji içeriği varsa, yakma sistemi yakıtının hacimsel verimi ile sınırlı olabilmektedir. Biyogazlı yakım sistemlerinde biyogazın daha dūřuk alev hızına imkân tanıyacak ateşleme ayarının yapılması gerekmektedir. Verilen gaz, besleme basıncında, gaz hava ile stokiyometrik oranda yanma odasına gōnderilmelidir. Biyogaz, propan veya metan için tasarlanmış basınçta brūlōr deliğinden akarsa, biyogazın içeriğindeki yūsek CO_2 nedeniyle hava yakıt oranı alev istikrarını sağlamada yetersiz kalabilecektir (Biomethan from Dairy Waste, 2005).

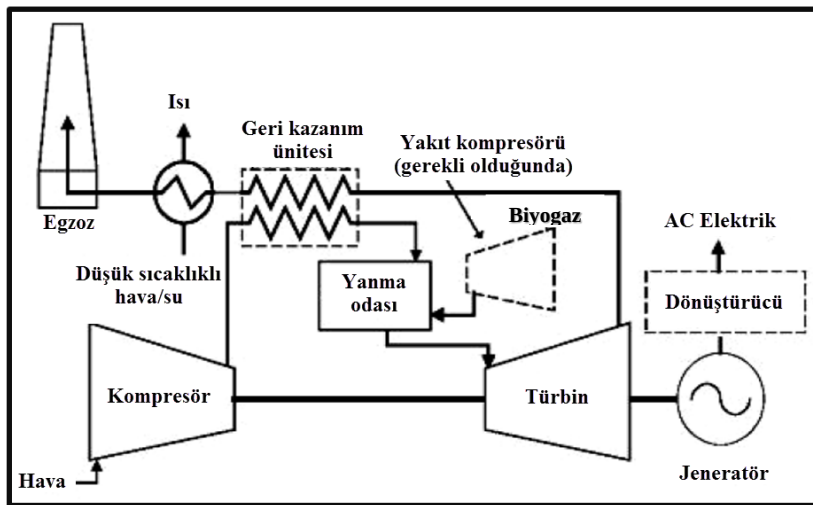
İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılarak, mekanik iř ve elektrik elde edilebilmektedir. Biyogaz tamamen kurutulmak ve saflaştırılmak suretiyle, gaz tūrbınlerinde de enerji ūretimi maksadıyla kullanılmaktadır. Őzellikle kojenerasyon ve trijenerasyon uygulamalarında, dūnyada geniş uygulama alanları mevcuttur. Biyogazın yanmasının kontrolū ve sabit akışının olması nedeniyle, stasyonel sabit devirli motorlarda kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Biyogaz hem doğrudan yanma, hem de elektrik enerjisine çevrilerek aydınlatmada kullanılabilmektedir. Biyogazın doğrudan aydınlatmada kullanımında, sıvılaştırılmış petrol gazları ile çalışan lambalardan yararlanılmaktadır. Bu sistemde aydınlatma alevini arttırmak ūzere amyant gōmlek ve cam fanus kullanılmaktadır. Cam fanus ışığı sabitleştirdiği gibi, çıkan ışıyı geri vererek alevin daha fazla olmasını sağlamaktadır (Eryařar ve Koçar; 2009).

Biyogaz, biyo-metana dōnūřtūrūlerek de doğalgazın kullanıldığı tūm cihazlarda kullanılabilmektedir. Bu saflaştırma işlemi ile gazın ısıl değeri artırılmış, korozyon etkisi ūnlenmiř, sağlık açısından zararlı maddeler uzaklaştırılmış ve çevreye olan etkileri azaltılmış olmaktadır.

Biyogaz ūretimi sonucu sıvı formda fermente organik gūbre elde edilmektedir. Elde edilen gūbre tarlaya sıvı olarak uygulanabilir, granūl haline getirilebilir ve/veya beton-toprak havuzlarda doęal kurumaya bırakılabilir.

Fermentasyon sonucu elde edilen organik gübrenin temel avantajı, anaerobik fermentasyon sonucunda patojen mikroorganizmaların büyük bir bölümünün yok olmasıdır.

Stirling motoru, içten yanma olmadan, “gazların sıcaklık değişiklikleri hacim değişikliklerine neden olur” prensibi ile çalışmaktadır. Motorun pistonları harici bir enerji kaynağından ısı enjeksiyonunun neden olduğu gaz genişmesi ile hareket ettirilir. Gerekli ısı, biyogazda çalışan bir gaz brülörü gibi çeşitli kaynaklardan sağlanabilir. Stirling motorlarını biyogaz ile çalıştırabilmek için birtakım adaptasyonlar gerekebilmektedir. Dıştan yanma nedeniyle, daha düşük metan içeriğine sahip biyogazın da kolaylıkla kullanılabilmesine olanak sağlanmaktadır Stirling motorlarında biyogaz kullanımının en büyük avantajı, biyogazın motor içerisine girmemesi ve dolayısıyla korozyon vb. sorunların ortadan kalkmasıdır. Buna ek olarak; dıştan yanma prosesinde, daha iyi emisyon kontrolüne ulaşılabilmektedir. Stirling motorlarının % 24-28 civarında olan elektriksel verimliliği, gaz/otto motorlarından daha düşüktür. Egzoz sıcaklığı 250-300 °C arasındadır. Stirling motorlarının kapasitesi genellikle 50 kW'ın altındadır. Bu da küçük işletme modelleri için uygun bir alternatif olduğunu göstermektedir. Genellikle bakım maliyetlerinin daha düşük olması beklenmektedir (Simeonov et al., 2006; Seadi et al., 2008).



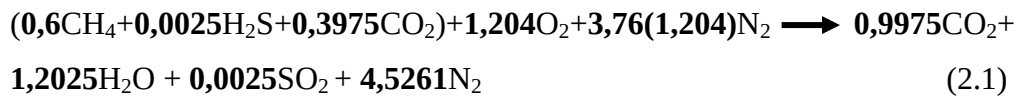
Şekil 2.4 Biyogaz mikro türbini.

Biyogaz mikro türbinlerinde hava, yüksek basınçta bir yanma odasına basılarak biyogazla karıştırılır. Hava-biyogaz karışımının yakılmasıyla birlikte sıcaklık artmakta ve gaz karışımının genleşmesine neden olmaktadır. Sıcak gazlar, alternatöre bağlı bir türbini döndürerek elektrik üretilmesi sağlanmaktadır (Şekil 2.4). Mikro-türbinlerin elektrik kapasitesi genellikle 200 kW'ın altındadır. Biyogaz mikro türbinlerinin maliyeti çok yüksektir. Ayrıca mikro türbinde yakıt olarak kullanılacak olan biyogazın içeriğindeki, tüm nem ve türbin sistemini etkileyebilecek zararlı bileşenlerin (H₂S gibi) arındırılması gerekmektedir (Seadi et al., 2008).

2.1.4 Biyogazın teorik yanma denklemi

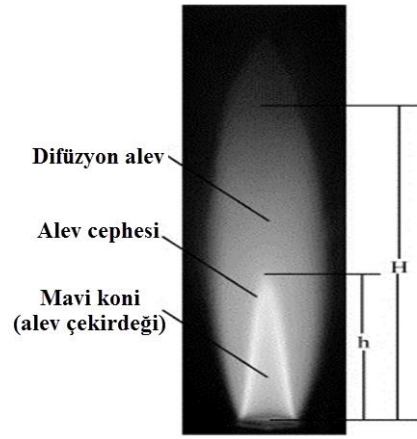
Geçmişteki düşük enerji fiyatları ve bu konudaki deneyimin çok az olması nedeniyle biyogaz kullanımına yönelik gelişim yavaş olmuştur. Katı ve sıvı yakıtlara kıyasla, gaz yakıtlar çok daha temiz yanmaktadır. Bu yakıtlar gaz fazında bulunduğu için, daha kolay homojen karışım haline gelirken hava talebi de düşmektedir. Gaz yakıt analizleri genellikle, yakıtın meydana geldiği bileşenlerin hacim analizleri ile belirtilmektedir.

Yanma olayı, yakıt içerisindeki karbon ve hidrojenin su ve diğer egzoz ürünlerini oluşturmak için hava içerisindeki O₂ ile girmiş olduğu kimyasal reaksiyon olarak tanımlanmaktadır. Hava hacimsel olarak, % 20,99 O₂, % 78,03 N₂, % 1'den daha düşük oranda ise diğer gazlardan meydana gelmektedir (Erşan, 1987; Acaroğlu, 2010). Buna göre 100 mol'lük hava içerisinde, 21 mol O₂ ve kabaca 79 mol de N₂ olduğu ifade edilebilmektedir. N₂/O₂ oranı bu durumda, 3,76 olmaktadır. Bu ifadeler ışığında, biyogazın teorik tam yanma denklemi;



şeklinde. Bu eşitliğe göre bir mol biyogaz için gerekli hava miktarı; $1,20375\text{O}_2 + 4,5261\text{N}_2 = 5,73$ mol olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda 1 m³ biyogazın (% 60 CH₄ + % 40 CO₂ içeriğine sahip) tam yanabilmesi için gerekli

hava miktarı $5,73 \text{ m}^3$ olarak bulunmaktadır (Erşan, 1987). Bu şartlardaki biyogazın yakılması düşünüldüğünde hesaplamalarda kullanılması gereken olan hava/yakıt oranı $5,73$ olarak kullanılmalıdır. Şekil 2.5’de, gaz yakıtların genel alev yapısı ve mavi alev konisi, gösterilmektedir. İdeal hava/yakıt oranına sahip yanma reaksiyonlarında karışımın dikey eksenli hızı, alevin önündeki tüm noktalarda bulunan yerel yanma hızına eşittir. Dolayısıyla gazın çıkış noktasına yakın bölgelerde, yerel yanma hızı düşük iken alevin ön yörüngesi boyunca sabittir (Amell, 2007). Bu nedenle alevin şekli ve kompozisyonu ile o yakıttan elde edilecek enerjinin büyüklüğü ideal karışım oranının tesisine bağlı olmaktadır.



Şekil 2.5 Gaz yakıtların alev yapısı. h: mavi koninin yüksekliği, H: difüzyon yanmanın yüksekliği (Amell, 2007).



Şekil 2.6 Biyogaz ve doğalgazın alev yapılarının karşılaştırılması (Gonzalez et al., 2009).

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi biyogazın alev yapısı doğalgaza kıyasla farklı yapıdadır. Biyogazın birincil yanma bölgesi olan iç koninin yüksekliği, doğalgazdan daha yüksektir. Alev iç konisinin yüksekliği, laminar yanma hızı ile ters orantılıdır (Amell, 2007). Bu nedenle alev büyüklüğü, doğalgazdan

büyük görünmekle birlikte alev hızı daha düşüktür. Biyogazın içeriğinde ppm seviyesinde bulunan H_2S , renksiz, çürük yumurta kokusunda zehirleyici bir gazdır. 1796 yılında C.Louis Berthallet tarafından, bileşiği meydana getiren elementler belirlenmiştir. Çok şiddetli bir zehir olarak kabul edilen H_2S 'nin çok düşük konsantrasyonlarda bile kokusu hissedilebilir. Sıvı hale getirilen bu kimyasal elektriği iletmez. Kaynama noktası $-60,75\text{ }^{\circ}C$, erime noktası ise $-3,70\text{ }^{\circ}C$ 'dir. Havadan 1,19 kat daha ağır olan H_2S 'nin kaynama noktasında, yoğunluğu 0,993 olmaktadır. Suda ve alkolde oldukça hızlı çözünmektedir. Yanıcı bir özelliği olduğundan, % 4,5-% 45,5 oranında hava içerisinde patlayıcıdır. 2015 yılı Ağustos ayında, çok yüksek basınç altında [150 GPa (81,5 milyon ATM)], H_2S 'nin 203 K ($-70\text{ }^{\circ}C$) sıcaklıkta süper iletkenlik gösterdiği keşfedilmiştir. Bu özelliği ile bugüne kadar bulunmuş en yüksek süper iletken dönüşüm sıcaklığına sahiptir (Anonim 5, 2016; Cartlidge, 2015). Biyogazın yakılması esnasında içeriğinde bulunan H_2S tepkimeye girerek SO_2 ve H_2O 'ya dönüşmektedir. SO_2 ise daha sonra H_2O ile tepkimeye girerek H_2SO_3 (sülfirik asit)'e dönüşür. Bununla birlikte SO_2 , O_2 ile tepkimeye girerek SO_3 'e, SO_3 ise H_2O ile tepkimeye girerek H_2SO_4 'e dönüşmektedir. Bu asitler motor parçalarında korozyon oluşumuna öncülük ederek, sahip oldukları formasyon sayesinde çok hızlı yağ bozulmasına ve motorun aşınmasına sebep olmaktadır (Erşan, 1987; Kuhnke, 2008; Koçar vd., 2010; Razbani et al., 2011).

Biyogazın içeriğindeki H_2S 'in giderilmesi için;

- Biyogazın içerisine O_2 veya hava verilmesi,
- Besleme materyaline demir klorür katılması,
- Demir talaş içerisinden biyogazın geçirilmesi,
- Aktif karbon kullanılması,
- Su ile temizleme,
- Sodyum hidroksit ile temizleme,

- Biyolojik desülfürizasyon şeklinde kullanılan yöntemler sıralanabilir.

Kanalizasyon sularından veya karışık çöp atıklarından elde edilen biyogaz içeriğinde siloksan denen kum benzeri kimyasalları bulundurmaktadır. Siloksanlar birçok kişisel bakım ürününe eklenen organik silikonlardır (Anonim 4, 2005). Bu siloksanlar; kojenerasyon ve türbinlere ciddi zararlar vermekte, motorun ömrünü kısaltıp işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Bu yüzden biyogazın içeriğindeki siloksanın giderilmesi önem teşkil eder. Bu amaçla, aktif karbon bazlı filtre sistemler kullanılmaktadır. Biyogazınızın içeriğine göre, H_2S ve Siloksan aynı anda tek filtre ile temizlenebilirken, siloksan giderimi ayrıca yapılabilmektedir. Bu sistemlerde aktif karbon granülleri kullanılmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerinde, motorun yanma odasında ve turbo ünitesinde meydana gelen siloksan birikimi, Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Siloksanlar, sıcaklığın yüksek değerlere ulaştığı ve yanma odası basınç artışının 15 MPa’ın üzerine çıktığı yanma işlemi sırasında parçalanarak, yeni ve agresif iki ürüne dönüşmektedir (Florez ve Egusquiza, 2015). Bu ürünler; Formaldehitler (CH_2O) ile genel olarak silikon asit olarak ifade edilen ortosilisik asitler (H_4SiO_4) dir (Plawsky et al., 2002; Schiayon, 2002). Söz konusu problemlerin büyük çoğunluğu, formaldehit aktivitesinden kaynaklanmaktadır.

Formaldehit, $-19,5\text{ }^{\circ}C$ ’nin üzerindeki sıcaklıklarda, çok aktif bir kimyasaldır. Bu kimyasallar; motor yağının bir biçimden başka bir biçime dönüşümünü sağlayan bir nevi polimerleştirici olarak görev yaptıklarından, motor içerisinde görülebilen yumuşak macunun üretilmesinden sorumludur. Diğer bileşik olan silisik asit $1704\text{ }^{\circ}C$ ’nin altındaki sıcaklıklarda katı haldedir ve formaldehit gibi çok aktif olan bir kimyasaldır. Motorların farklı parça ve bölgelerinde silikatların oluşmasına veya yanma odası yüzeylerinde katı katmanların meydana gelmesine neden olmaktadır (Florez and Egusquiza, 2015).



Şekil 2.7 Siloksanların motor parçaları üzerine etkileri (Florez and Egusquiza, 2015).

Yanma odası, termodinamik verimi arttırmak üzere tasarlanmıştır. Yanma odası yüzeylerindeki katı birikintiler biyogaz içerisinde bulunan siloksanların termal bozunumunun bir sonucudur. Yanma odasının yüksek sıcaklığı altında, bazı yakıt bileşenleri ve motor sıvıları arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilmektedir. Örneğin, yanma odası yüzeylerinde bulunan motor yağı siloksanların termal parçalanma bileşikleri (formaldehit ve ortosilik asit) ile etkileşime girmektedir. Bu etkileşim sonucunda, yanma odasında katı birikintiler oluşmaktadır. Bu macunumsu birikintiler, piston yüzeylerinde ve segmanlarda da görülmektedir. Yüksek yanma sıcaklığı, yanma odasında biriken siloksanların motor yağını etkilemesine neden olduğundan, motorun kirlenme seviyesini tanımlamak ve potansiyel hasarını belirlemek maksadıyla motor yağının analiz edilmesi önemlidir (Florez and Egusquiza, 2015).

2.1.5 Biyogazın yanma özelliklerine ilişkin tarihsel süreç

Günümüzde ilk modern biyogaz tesisi 1859 yılında Bombay’da inşa edilmiştir. 1895 yılında bu tesis İngiltere’ye de taşınmıştır. İlk orijinal biyogaz kullanımı, Perslere kadar uzanmakla birlikte günümüzden 2000-3000 yıl öncesinde Çin’de de kullanılmıştır (Razbani et al., 2011). 1942-1944 yıllarında İsviçre’de çöp kamyonlarında saflaştırılmış ve sıkıştırılmış lağım gazı kullanılmıştır (Stolpp, 2016). 1955 yılında petrolün bollaşmasıyla, biyogaz önemini büyük oranda kaybetmiştir. Petrol fiyatlarının çok ucuz olması nedeniyle, neredeyse tüm biyogaz tesisleri kapatılmıştır. Ancak

1980'lerden sonra meydana gelen enerji krizi, biyogazı içten yanmalı motorlarda elektrik üretimi için yeniden önemli hale getirmiştir (Deublein and Steinhauser, 2008). 1981 yılında Hickson, biyogaz kullanarak bir dizel motorunu benzinli motora çevirmiştir. Sonuç olarak; dizele oranla %35, benzinli motora oranla % 40 daha az güç elde etmiştir. Aynı yıl Neyeloff ve Cunkel tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada suni biyogaz ile çalıştırılan bir CFR motoru kullanılmıştır. Değişik sıkıştırma oranlarında yapılan deneyler sonucunda optimum sıkıştırma oranı, 15:1 olarak belirlenmiştir (Neyeloff and Cunkel, 1981; Thring, 1985). Düşük ısı değeri, korozyon yapıcı içeriği ve taşıma zorlukları biyogazın ana problemleridir. 1983 yılında Thring, biyogazın üretildiği yere yakın olan bölgelerde kullanımının çekici olabileceğini belirtmiştir. Biyogaz, doğalgaz gibi gaz yakıtların metanol veya benzin gibi sıvı yakıtlara dönüştürülmesi önerilmiştir (Thring, 1985).

Jenbacher (1985) ise elektrik ve ısı üretmek için zayıf gazların yakılabildiği birleşik enerji sistemleri üzerinde durmuştur. Silindir içerisine daha fazla yakıtı gönderilmesi için hava/yakıt oranı kontrol edilmiştir. Ama daha büyük giriş valfi için silindir kapağının modifiye edilmesi gerekmiştir. Wunsche, gaz kompozisyonunu tanımlamamış ancak, motor yakıtı için kullanılan gazın düşük metan sayısını tespit etmiştir. Daha sonra, vuruntu direnci için vuruntu sensörü kullanılmış ve vuruntuyu tespit edebilmek için de tutuşma süresi geciktirilmiştir (Wunsche, 1985).

1987 de, diğer bir büyük motor üreticisi olan Caterpillar tarafından, çöp gazı ile çalışan buji ile ateşlemeli motor denenmişlerdir. Biyogazın olumsuzlukları çözülmeye çalışılmış ve sonunda motorun gerçek çöp gazı ile çalıştırılması sağlanmıştır (Macari and Richardson, 1987). Brezilya'da 1992'de, biyogaz ve alkol yakıtları ile Volkswagen araçlarda çalışmalar yapılmıştır. Ateşleme zamanı, karışımın dağıtımı ve emisyonlar araştırılmış ve maksimum taşıt hızı, ivmelenme ve maksimum motor hızı gibi farklı taşıt parametreleri değerlendirilmiştir (Filho, 1992). Buji ile ateşlemeli motorların biyogaz ile çalışacak şekilde dönüştürülmesi kolay olurken, çift yakıtlı motorların bazı avantajlar sergilediği gözlenmiştir. 1990 yılından sonra, dizel motorlar çift yakıtlı biyogaz motorlara dönüştürülmeye başlanmıştır.

Deri ve Mancini tarafından, bir dizel motoru çift yakıtlı motora dönüştürülmüş ve karışımın tutuşturulması amacıyla pilot dizel yakıtı kullanıldığı için fakir karışımlarda daha stabil bir yanma olduğu gözlenmiştir. (Deri ve Mancini, 1990).

Karim ve Wierzba, içeriğinde CO₂ olan metan/hava karışımının kinetik ve termodinamik karakteristikleri üzerine çalışmışlardır (Karimi and Wierzba, 1992). Tanoue ise, düşük yanma hızı ve yanabilirlik gibi biyogazın yanma limitlerini geliştirebilmek amacıyla fakir metan karışımına hidrojen eklenmesinin etkisini araştırmıştır. Hidrojen katkısının ana fikri, içten yanmalı motorlardaki gazın yanma özelliklerini yükseltmektir (Tanoue et al., 2000). Mueller, ön yanma odalı konsepti kullanımıyla, her hangi bir güç kaybı olmaksızın çöplük gazı uygulamasının bir buji ile ateşlemeli motorlarda başarıyla kullanılabileceğini rapor etmiştir (Mueller, 1995).

2.2 Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı

Enerji bir cismin veya bir sistemin iş yapma yeteneğidir. İçten yanmalı motorlar, yakıttaki kimyasal enerjiyi ısı enerjisiye, ısı enerjisiye mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi de kinetik enerjiye dönüştürmektedir. Bu dönüşümün başlangıcı yanma adı verilen kimyasal bir reaksiyondur. Yanmanın gerçekleşebilmesi için ortamda mutlaka yakıt, O₂ ve ısı birlikte bulunmalıdır. Fakat ortamda yeterli miktarda ısı varken hava ile yakıt karışımı yanmayabilir. Bunun sebebi her yakıt için farklı olan yanabilirlik sınırı ile açıklanmaktadır. Yakıtın hava içerisine azar azar ilave edilmesi esnasında yanmanın başladığı ana, “alt alevlenebilirlik sınırı” denilmektedir. Hava içerisine yakıt ilavesine devam edildiği takdirde, karışımın yanmasının sonlandığı duruma da “üst alevlenebilirlik sınırı” adı verilmektedir (Acaroğlu, 2010).

İçten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak kullanılan tüm yakıtlar, tutuşabilmesi için faz değişimine (sıvıdan gaza geçiş gibi) ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle özellikle gaz yakıtlarla çalışan motorlarda yanma, daha düşük yakıt/hava oranlarında da gerçekleşebilmektedir (Koçar vd.,

2015). Gaz yakıtlar yüksek yanabilirlik limitleri ve kolayca homojen karışım oluşturabilme özellikleri sebebiyle, iyi birer yakıt olarak kabul edilmektedir.

İçten yanmalı motorlardan mekanik enerjiyi elde edebilmek amacıyla, yakıt kaynağının içeriği, ısı değeri ve yanabilmesi için gerekli sınır hava şartlarının uygunluğu gerekmektedir. Biyogazın, sahip olduğu 18-25 MJ/kg ısı değeri, düşük karbon bileşenli metan içeriği ve 5,73/1 hava/yakıt oranı ile içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılabileceği kabul görmektedir. İçten yanmalı motorlarda 1 kWh enerji için, yaklaşık 0,45-0,8 m³ biyogaza ihtiyaç vardır (Werner et al., 1989).

% 95 metan ihtiva eden zenginleştirilmiş biyogazda elde edilen çıkış gücü, özgül gaz tüketimi ve termal verimlilik sonuçları, motor performansının sıkıştırılmış doğal gaza benzer olduğunu göstermektedir (Chandra et al., 2011; Surata et al., 2014). Böylece, gaz halindeki metan bakımından zenginleştirilmiş biyogaz, şebeke doğal gaz karışımlarıyla aynı maksatlarla (elektrik üretimi, ısı üretimi, iş üretimi vb.) kullanılabilmektedir.

Biyogaz yakıt olarak kullanıldığında, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında genel olarak % 100 orana kadar etkili olabilmektedir. Taşıt yakıtı olarak kullanılan doğal gaz, % 20-30 daha düşük CO₂ emisyonu sağlamaktadır. Biyogazın doğal organik bileşiminden dolayı, elektrik üretimi için gaz motorunda yakılması sonucu çıkan CO₂ emisyonu ile doğal CO₂ çevriminde fotosentez ile absorblanan CO₂ aynı miktardadır. Ancak, güçlü bir sera gazı olan metan, geleneksel gübre depolama alanlarından direk olarak atmosfere salınmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak biyogazın kullanımı hem metan kaçaklarını hem de gübrelemeyi azaltırken, fosil CO₂ emisyonlarını azaltmaktadır. Bir diğer avantajı ise, zenginleştirilmiş biyogaz veya doğal gazla çalışan araçların, NO_x ve SO_x ve partikül emisyonlarının çok daha düşük olmasıdır (Papacz, 2011). Biyogazın ihtiva ettiği CO₂ sebebiyle, yanma hızı düşmektedir. % 60 metan içeriği olan biyogazın alev hızı 25 cm/s iken, bu hız LPG de 38-44 cm/s olarak gerçekleşmektedir (Rama, 2001; Porpatham et al., 2008).

Wobbe indeksi (I_w), gaz cihazlarında, ısı yükleri bakımından gaz yakıtlarının birbiri yerine ikame edilebilme durumlarının ifade edildiği bir sayıdır. Üst veya alt ısı değerine göre yine üst ve alt wobbe indeksi belirlenebilmektedir (TS 7363, 2008). Birbiri ile kıyaslanan iki gaz yakıt aynı/benzer wobbe indeksine sahip ise, verilen basınç ve subap ayarları için enerji çıkışlarının da aynı olacağı kabul edilmektedir. Özellikle doğalgaza alternatif olarak değerlendirmek istenen yakıtların kullanımında, sistem içerisinde meydana gelebilecek değişimlerin en aza indirgenebilmesi beklenmektedir. Net sonuca ulaşılması için tek başına yeterli bir gösterge olmayacağı da unutulmamalıdır. Wobbe indeksi, denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$Wobbe\ Index = \frac{Isıl\ Değer}{\sqrt{\text{ÖzgölAğırlık}}} \quad (2.2)$$

Bazı gaz yakıtların alt ve üst ısı değerlerine bağlı olarak hesaplanan wobbe indeksi değerleri, Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Gaz yakıtların wobbe indeksi değerleri.

Gaz Yakıt	Üst Wobbe İndeksi (MJ/Nm ³)	Alt Wobbe İndeksi (MJ/Nm ³)
Hidrojen	48,23	40,65
Metan	53,28	47,91
Etan	68,19	62,47
Etilen	63,82	60,01
Doğalgaz	53,71	48,52
Propan	81,07	74,54
Propilen	77,04	71,88
n-bütan	92,32	85,08
İso-bütan	91,96	84,71
LPG	86,84	79,94
Asetilen	61,32	59,16
Karbonmonoksit	12,80	12,80

Biyogaz, sabit ve değişken devirli motorlarda kullanılabilmeyle birlikte, ısı değerinin diğer fosil yakıtlara kıyasla düşük olması, çok yüksek sıvılaştırma

basıncı gibi sebeplerle daha çok stasyonier tip motorlarda kullanıma uygundur. Değişken devirli taşıt motorlarında kullanımında, içeriğindeki CO₂'in alınarak biyometan haline getirilmesi gerekmektedir. Biyogaz içeriği ve yakıt özellikleri itibari ile hem gaz motorlarında, hem benzinli motorlarda hem de dizel motorlarda farklı yöntem ve ekipman ile kullanılabilir.

2.2.1 Gaz motorları

Gaz motorları, otto çevrimi ile çalışabilen motorlardır ve bu motorlar çeşitli gaz yakıtların da ideal şekilde kullanılabilmesi için tasarlanmıştır. İdeal hava/yakıt oranı altında çalışmaktadırlar. Gaz motorlarında hava/gaz karışımı, modele bağlı olarak gaz karıştırma vanaları, venturili karıştırma üniteleri, gaz enjektörleri veya mikserler kullanılarak sağlanmaktadır. Bu farklı türdeki gaz/hava karışım sistemlerinin dışında, benzinle çalışan diğer otto motorlarıyla aynı ölçüt ve parametreler izlenmektedir.

Gaz karıştırma valfleri, hava ve gaz girişlerini, gaz keleşi ve hava girişı arasındaki basınca göre açan bir diyafram ile sağlamaktadır. Hava/yakıt oranı, bu diyaframın açıklık miktarına göre belirlenirken ince kalibrasyon, gaz girişinde kütle akışının değıştirilmesi ile sağlanmaktadır (Mitzlaff, 1988). Venturi olarak da tabir edilen akışkanın bir kesitten geçerken borunun cidarlarında meydana getirdiğı alçak basınca bağlı olarak çalışan klasik karbüratörlerin kullanıldığı gaz motorlarında homojen karışım, karbüratör içerisindeki venturi boğazı ile sağlanmaktadır. Karıştırma odalı (örneğin T tip mikser) yakıt sistemlerinde hava ve yakıt, motorun emişinden bağımsız olarak sabit bir oranda tedarik edilememekte ancak harici valfler tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle bu tür karıştırma ünitesine sahip motorlar, sabit devirli ve stasyonier olarak kullanılabilir (Mitzlaff, 1988; Benz, 1985). Bunun dışında, sadece metan kullanımı maksadıyla 12/1'den daha yüksek sıkıştırma oranına sahip spesifik gaz motor tipleri piyasada bulunmamaktadır. Bu motorların ateşleme noktası, karıştırıcı ekipmanları ile kullanılacak gazın türüne ve ısı değeri göre farklılık göstermektedir. İçeriğindeki CO₂ ile birlikte, biyogazın gaz motorunda kullanılması durumunda daha az miktarda havanın emilmesi söz konusu olacaktır. Biyogaz ve hava karışımının sahip

olduğu enerji, LPG, doğalgaz gibi gaz yakıtlara kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle saflaştırılmamış biyogaz kullanıldığında, gaz debisinin daha yüksek tutulması gerekmektedir.

2.2.2 Biyogazın benzin motorlarında kullanımı

Otto çevrimi ile çalışan benzinli motorlar, sahip olduğu 7/1-9,5/1 aralığındaki sıkıştırma oranı sayesinde, herhangi bir değişiklik yapılmaksızın biyogaz ile çalışabilmektedir. Ancak yakıt sisteminde bir takım değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Örneğin, karbüratörün sistemden çıkarılıp yerine, gaz/hava karışımının daha homojen olabilmesi için gaz karbüratörleri veya mikserleri yerleştirilmelidir. Bu sayede venturi prensibinin de etkisi ile ideal hacimsel karışım elde edilmiş olunur. Bu, günümüzdeki çok noktalı ve direk enjeksiyonlu LPG dönüşümünün temelini teşkil etmektedir (Erşan, 1987).

Gaz yakıtların, otto motorlarında kullanımı esnasında benzine kıyasla daha düşük güç ürettiği bilinmektedir. Bunun en temel sebebi, sahip olunan ısı değerleri arasındaki farklılık ve gaz yakıtların hacimsel verimliliğinin düşük olmasıdır. Sıvı yakıtlar, yanma odası içerisinde, gaz yakıtlara kıyasla daha yüksek enerji içeriğine sahiptir.

Sıvı yakıtlar, emme manifoldunda buharlaşırken hava/yakıt karışımının soğumasına ve buna bağlı olarak karışımın yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, emme manifolduna emilen hava/yakıt miktarının da yükselmesine sebep olmaktadır (Mitzlaff, 1988). Biyogaz içeriğinde bulunan ve nötr bir gaz olan CO₂ nedeniyle, gerekli miktarda gaz yakıtın yanma odasına alınabilmesi için daha az miktarda havanın emilmesi gerekmektedir. Ayrıca biyogazın çok yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sayesinde buji ile ateşlemeli motorlarda vuruntu direnci de yükselmekte, motorda sıkıştırma oranı artırılarak performans kaybının azaltılması sağlanabilmektedir.

Artan sıkıştırma oranı, motorun termik verimini artırarak güç düşüşünü daha makul seviyelere çekebilmektedir. Bunun yanında sıkıştırma oranının

artırılması ile HC emisyonlarının düşürülmesi sağlanmaktadır (Huang and Crookes, 1998; Porpatham et al., 2008; Porpatham and Ramesh, 2013).

2.2.3 Biyogazın dizel motorlarda kullanımı

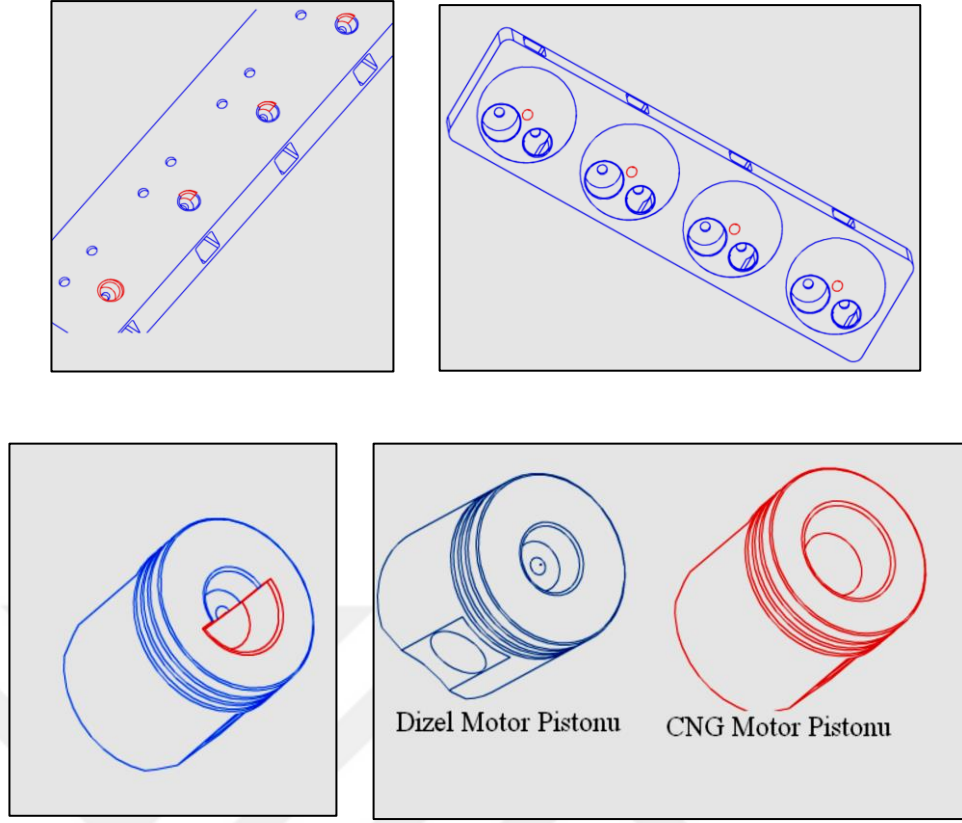
Dizel motorları ısı veriminin, benzinli motorlara kıyasla daha yüksek olması, bu motorlara daha yaygın kullanım alanı sağlamaktadır. Bu geniş kullanım perspektifi içerisinde biyogaz da yerini almaktadır. Biyogazın, temel olarak iki farklı yöntem ile dizel motorlarında kullanımı söz konusudur.

Bunlardan birincisi, teorik olarak sabit basınç ve sabit hacimde enerji girişinin olduğu dizel çevrimini, otto çevrimine dönüştürmektir. Diğer bir anlatımla dizel motorunu gaz motoruna dönüştürmektir. İkinci yöntem ise, hem dizel yakıtın hem de biyogazın eş zamanlı olarak kullanılmasına imkân tanıyan çift yakıt teknolojisinin uygulanmasıdır.

2.2.3.1 Dizel motorunun gaz motoruna dönüştürülmesi

Dizel motorların, mevcut yakıt sisteminin kaldırılarak yerine ateşleme sistemi ilave edilmesi suretiyle gaz motoruna dönüşümü yapılabilmektedir. Bu teknik ağır hizmet tipi taşıtlara uygulanan bir yöntem olmakla birlikte, sahip olduğu termik verim ve bulunabilirlik gibi etkenlerden dolayı gaz yakıt olarak doğalgaz tercih edilmektedir (Asian NGV Communications, 2012).

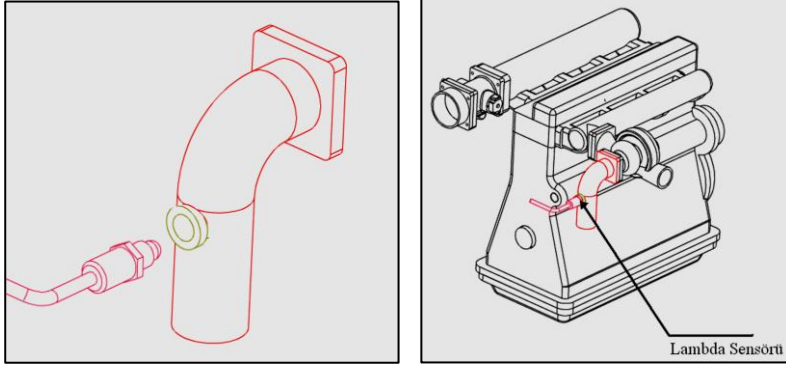
Dizel motorlarda buji ilavesinin yapılabileceği bir delik bulunmadığından, genellikle dizel yakıt sisteminde kullanılan kızdırma buji delikleri veya enjektör delikleri bu görev için tercih edilmektedir. Ateşleme sistemi eklenmesi ile ilgili genel anlamdaki değişiklikler, Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



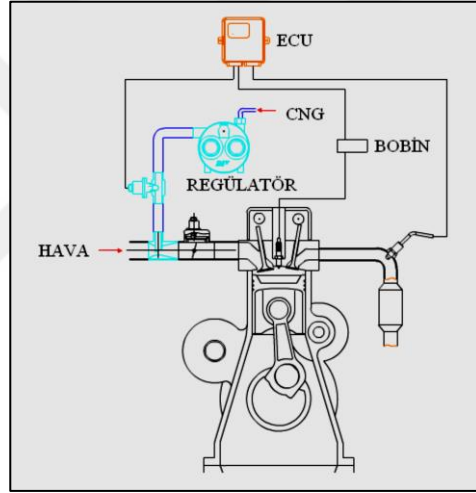
Şekil 2.8 Yanma odası hacminin genişletilmesi.

Dizel motoru, doğalgaz motoruna dönüştürülürken hali hazırda var olan pistonlarda da bazı modifikasyonlar yapmak gerekebilmektedir. Varolan pistonların modifikasyon yapılmadan kullanılması durumunda, ortalama 17:1'lik bir sıkıştırma oranı vurutuya sebep olabilmektedir. Bu sebeple, yanma odası hacmi genişletilmektedir (Şekil 2.8). Benzer şekilde emisyonların ve yanmanın kontrol altında tutulabilmesi maksadıyla, egzoz manifolduna lambda sensörünün ilave edilmesi gerekmektedir (Şekil 2.9). Motorun değişken devire bağlı olarak ihtiyaç duyacağı optimum H/Y oranının ideal homojenlikte sağlanabilmesi, lambda sensörü verilerini işleyebilmesi ve en uygun yanma gereksinimlerini sağlayabilmesi maksadıyla ECU ve bir karıştırıcı düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Elektronik kontrol ünitesinin görevi, yakılacak yakıt-hava karışım oranını ayarlamayı sağlamaktır. Bu oranı ayarlamak için egzoz gazındaki O_2 oranı ölçülmekte ve ECU'ya sinyal gönderilmektedir. Lambda sensörü, egzoz gazından aldığı bilgileri ECU'ya göndermekte ve ECU da yakıt hava oranının ayarlanmasını sağlamaktadır.

Sistemin dönüşüm sonrası genel görünümü Şekil 2.10’da sunulmuştur (Sezgin, 2009).



Şekil 2.9 Lambda sensörünün montajı

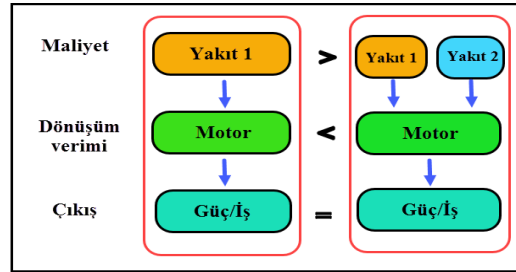


Şekil 2.10 Sistemin genel görünüşü

Biyogazın içeriğinde bulunan ve yanmayı yavaşlatıcı özelliğe sahip inöört bir gaz olan CO_2 sebebiyle, burada ifade edilen dönüşüm sistemi biyogaz için uygun olmamaktadır. Motor performansında meydana gelen ciddi düşüşler ve yanma kontrolünün zor olması nedeniyle, biyogazın tek yakıt olarak kullanımı kısıtlıdır. Ayrıca biyogazın yüksek tutuşma sıcaklığı ve yüksek metan sayısı nedeniyle, buji kıvılcımının meydana getirdiği enerji, biyogazın alev almasında güçlükler sebepten olabilmektedir.

2.2.3.2 Biyogazın çift yakıt sistemi ile kullanımı

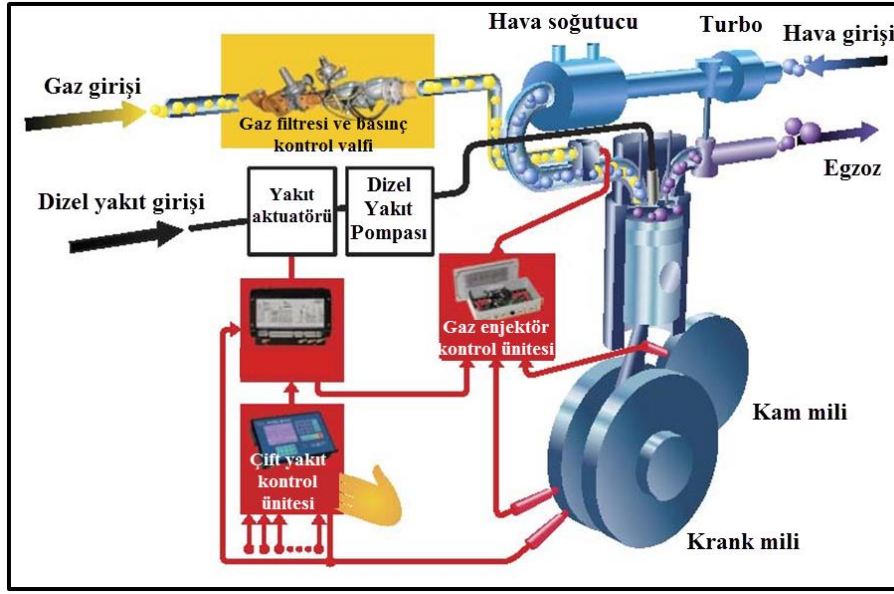
Çift yakıt teknolojisi, motorların eş zamanlı olarak iki farklı yakıtı kullanabildiği, ihtiyaca ve ortama bağlı olarak orijinal yakıt ile tek yakıtlı olarak çalışabilen sistemleri ifade etmektedir. Çift yakıtlı sistemlerde sıvı + sıvı veya sıvı + gaz yakıtlar aynı anda kullanılabilir. Dizel motorlarda biyogazın veya diğer gaz yakıtların (doğalgaz, saf metan, LPG, hidrojen vb.), en ekonomik kullanım metodu çift yakıt düzeneğidir. Modifikasyon maliyetlerinin çok düşük olması, ihtiyaç halinde tek yakıtlı olarak da kullanım imkânının bulunması sebebiyle günümüzde popülaritesi artan bir yöntemdir (Mansour et al., 2001; Saraç, 2011; Tutak and Jamrozik, 2014). Sıvı ve gaz yakıtlı olarak tasarlanan sistemlerde, emme manifolduna gaz hattının ilave edilmesi, en büyük farklılık olarak görülmekle birlikte sistemin ihtiyaç duyacağı diğer düzenlemeler büyük oranda motorun sahip olduğu mevcut ayarlamalar ile giderilebilmektedir. Çift yakıt teknolojisi, sahip olduğu alternatif yakıt kullanabilme yeteneği sayesinde maliyetlerin azaltılmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 2.11’de, çift yakıt sistemi ile tek yakıt sisteminin maliyet ve verimlilik kıyaslaması görülmektedir.



Şekil 2.11 Çift ve tek yakıt sistemlerinin genel anlamdaki kıyaslaması.

Ana yakıt olarak gaz yakıtların ve pilot yakıt olarak da sıvı yakıtların tercih edildiği çift yakıtlı motor sistemlerinde, doğalgaz, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), propan, biyogaz, çöp gazı, hidrojen vb. birçok alternatif gazın kullanım imkânı bulunmaktadır. Gaz yakıtların, konvansiyonel sıvı yakıtlara kıyasla çok daha düşük üretim ve kullanım maliyetlerinin bulunması, sistemin yukarıda ifade edilen avantajlarını artırmaktadır. Özellikle enerji üretimi konusunda dışa bağımlılığı olan ülkelerde; maliyetler hem cari açığın kontrol altında tutulabilmesi, hem de arz talep dengesinin sağlanmasında çok önemli

bir husustur. Bu sistemlerde ana yakıt olarak isimlendirilen gaz yakıt ile hava, emme sistemi içerisinde karıştırılarak homojen bir şekilde silindir içerisine alınmaktadır. Silindir içerisine alınan bu karışım, daha sonrasında dizel yakıt ile tutuşturularak enerji dönüşümü başlatılmaktadır. Gaz/dizel çift yakıt sisteminde gaz emme manifolduna gaz enjektörleri, basit mikser düzenekleri veya gaz karbüratörleri gibi bir çok farklı yöntem ile bağlanabilmektedir. Şekil 2.12’de bir dizel motorunun gaz/dizel çift yakıt motoruna dönüşümünün genel şeması görülmektedir.



Şekil 2.12 Gaz/dizel çift yakıtı dönüşüm şeması (Anonim 11, 2017).

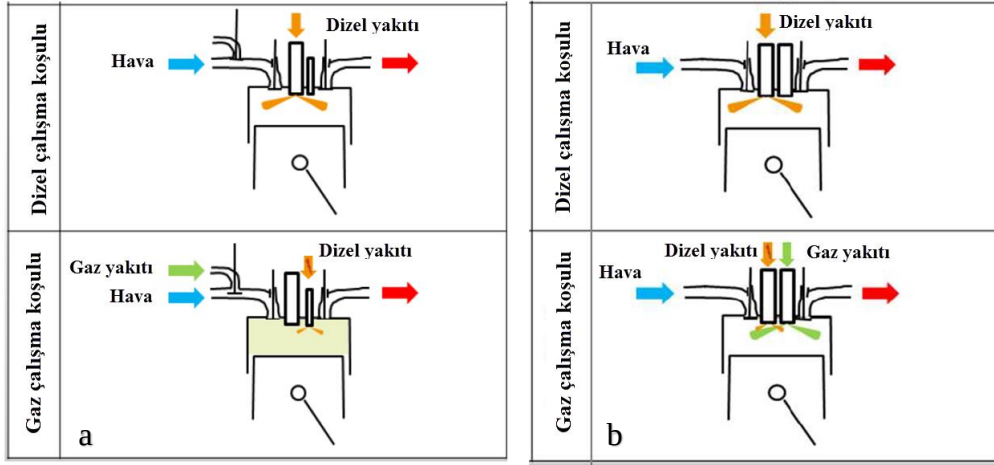
Genel olarak ifade edildiğinde; tek yakıtlı dizel motorlarda, sıkıştırılarak basıncı ve sıcaklığı artırılan havanın içerisine sıvı dizel yakıtı enjektör aracılığı ile yüksek basınçta püskürtülür. Püskürtülen bu yakıt sıkıştırılmış hava içerisinde buharlaşarak çözünür ve tutuşma sıcaklığına ulaştığında kendiliğinden alev alarak yanma süreci başlatılmış olur. Bu yanma sürecinde karışım homojenliğinden ziyade, dizel yakıtının iyi atomize olması önemlidir. Dizel yakıtında yanmanın kontrolü; püskürtme şekli, püskürtme basıncı ve püskürtülen yakıtın miktarı ile kontrol edilmektedir. Çift yakıtlı çalışmada ise yanma, alevin yayılması ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu nedenle hem yakıtı tutuşturacak alev, hem de ana yakıt/hava karışımının homojenliği ön plana çıkmaktadır. Ana yakıtın tutuşmasını sağlayacak olan alevin büyüklüğü

ve kalitesi, normal dizel motorlarda olduğu gibi püskürtme basıncı, püskürtme şekli ve iyi atomizasyon ile sağlanmaktadır. Dizel yakıtının bir buji gibi tutuşturucu olarak kullanılması ile elde edilmekte olan enerji, buji kıvılcımının sahip olduğu enerjiden çok daha yüksektir (Poonia et al., 1998; Ashok et al., 2015). Pilot alevi ile elde edilen enerjinin büyük olması karışımın çok daha fakir oranlarında alev almasına imkân tanıdığından, hava fazlalık katsayısının 2'lere ulaştığı ilk çalışma anında dahi sıkıntısız ilk hareket elde edilebilmektedir (Yiğit, 2008).

Püskürtülen pilot yakıt miktarı, normalde püskürtülmesi gereken yakıt miktarının %10-%20 oranı arasında gerçekleşmektedir. Bazı farklı çalışmalarda, çeşitli modifikasyonlar ve sistem değişiklikleri ile bu pilot yakıt miktarının % 1'in altına indirildiği bildirilmiştir (Senghaas et al., 2016; Schmid, 2016; Kawase et al., 2016). Mikro enjeksiyonlu tip çift yakıtlı motorlar olarak adlandırılan bu sistemlerde, dizel yakıt dönüşüm oranı çok yüksek değerlere çekilmektedir. Bu tip çift yakıt dönüşüm sistemleri daha maliyetli olmakta ve geniş çaplı modifikasyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemlerde, iki farklı delik çapına sahip tek enjektör veya farklı delik çaplarına sahip iki enjektörlü yapılar kullanılmaktadır (Wärtsilä, 2009; Willmann et al., 2014; Ryu et al., 2016). Bu sistemler gemi, tren gibi büyük kapasiteli motorların çift yakıt dönüşümünde tercih edilmektedir. Çift yakıtlı motorların dönüşümünde, üç temel enjektör yapısı kullanılmaktadır. Bunlar; çift enjektör yapısı, tek enjektör çift memeli yapı ve geniş püskürtme aralığına sahip tek enjektör yapısıdır. Çift yakıt memesine sahip enjektör ile tek memeye sahip geniş kullanım aralığına sahip enjektör tipi, Şekil 2.13'de görülmektedir. Çift ve tek enjektörlü büyük hacimli çift yakıt sistemine sahip motorlarda püskürtme olayı, Şekil 2.14'de gösterilmektedir. İkisi arasındaki temel fark, farklı meme çaplarının aynı enjektör üzerinde veya farklı enjektörlerde olmasından kaynaklanmaktadır.



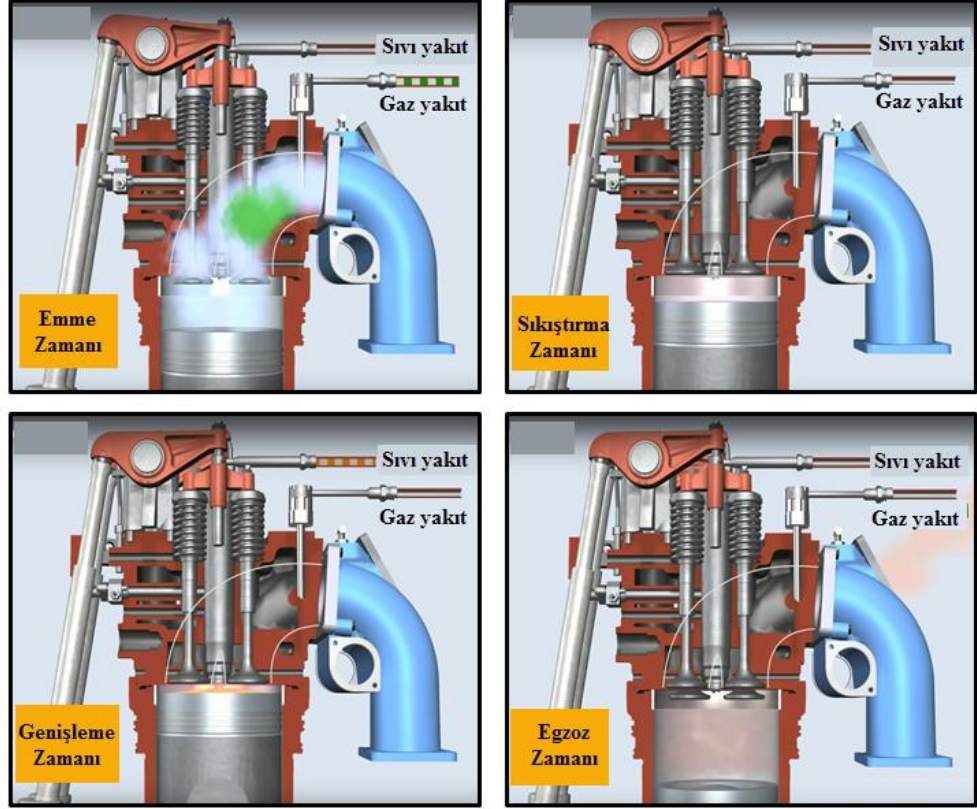
Şekil 2.13 Çift memeye sahip gaz/dizel çift yakıt motor enjektörü (Wärtsilä, 2009).



Şekil 2.14 Homojen (a) ve heterojen (b) yanma prosesleri.

Çift yakıtlı gaz/dizel motorlarının çevrimi, normal dizel ile aynıdır. Şekil 2.15’de, söz konusu motorların dört zamanlı çevrimi gösterilmektedir. Bu işlem kısaca özetlenecek olursa; emme zamanında, emme sisteminde homojen olarak dağılımı sağlanmış gaz/hava karışımı silindir içerisine alınır. Bu karışımın (doğal gaz/biyogaz gibi metan sayısı ve tutuşma sıcaklığı yüksek gazlar esas alındığında), sıkıştırma zamanında sıkıştırılarak basıncı ve buna bağlı olarak sıcaklığı artırılır. Ancak yüksek metan sayısı nedeniyle sıkıştırma sonunda, erken ateşleme veya detenasyon şeklinde ifade edilen olay meydana gelmez. Sıkıştırma zamanının sonuna doğru dizel yakıt enjektörlerinden, basıncı ve sıcaklığı artırılmış karışımın içerisine pilot yakıt püskürtülür. Bu püskürtme ile birlikte önce pilot yakıt alev alır ve yanma süreci başlatılmış olur. Pilot yakıtın alev alması ile yanma odasında gaz

karışımının tutuşmasına yetecek kadar enerji açığa çıkarılır ve ana yakıt olarak nitelendirilen karışım tutuşturularak, iş zamanında pistondan mekanik enerji elde edilmiş olunur. Yanmanın tamamlanmasını müteakip, egzoz gazları dışarı atılır (Ashok et al., 2015).

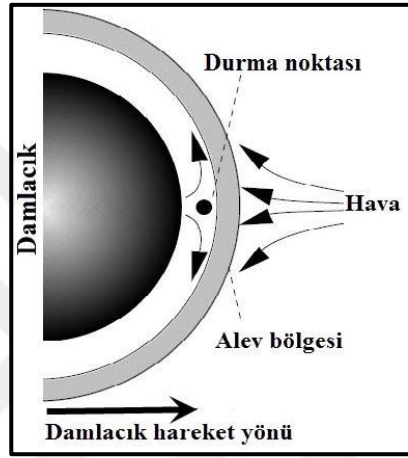


Şekil 2.15 Dizel/gaz çift yakıtlı motorların çevrimi (Ashok et al., 2015).

Motorun türüne (direkt enjeksiyon veya port enjeksiyonu) ve gaz yakıtın tedarik sistemine bağlı olarak, yanma süreci ve motor çıkış gücü değişebilmektedir. Düşük gaz/sıvı yakıt dönüşüm miktarları, kurum emisyonunun azaltılmasında ve performansın iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olmamaktadır. Bunun tersi durumlarda, çok yüksek gaz içeriği kullanıldığında silindir basıncının hızla artmasına neden olarak motora zarar verilebilmektedir.

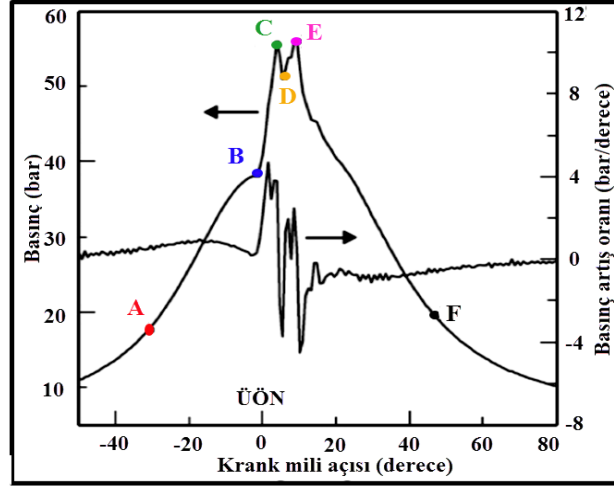
Tek yakıtlı dizel motorun yanma süreci, ateşleme gecikmesi, hızlı yanma, kontrollü yanma ve yanma sonrası dönem olmak üzere dört aşamada gerçekleşir (Heywood, 1988; Ergenç, 2009). Enjektörden püskürtülen yakıt,

hava ile sürtünme sonucunda parçalanır. Yakıtta parçalanma oranı, demet çevresindeki sürtünmelerin fazlalığı nedeni ile daha yüksek olur ve çevrede daha küçük taneli damlacıklar oluşur. Yüksek sıcaklık ve yoğunluktaki hava içerisine püskürtülen yakıt damlacıkları, kısmen buharlaşır. Küçük taneli damlacıkların kütlelerine göre, hava ile temas yüzeyleri daha fazla olduğundan ilk buharlaşan ve yanmaya hazır olan yakıt zerrelere bu demet çevresinde oluşur. Şekil 2.16’da yakıt damlacığının, hava ile teması görülmektedir (Atmanlı, 2013).



Şekil 2.16 Dizel yakıtın hava ile teması (Atmanlı, 2013).

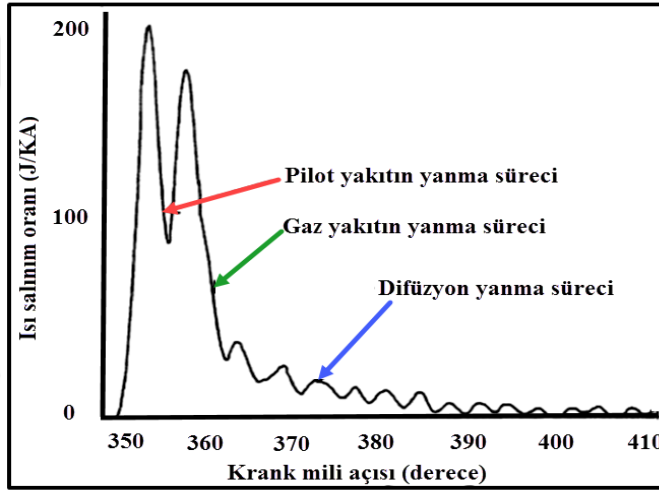
Gaz/dizel çift yakıtlı motorlarda kullanılan çok delikli enjektörler sayesinde alev yanma odasında birden çok bölgede eş zamanlı olarak hızlı ve düzgün olarak başlatılabilmektedir. Çift yakıtlı motorlardaki bu yanma, yukarıda da ifade edildiği gibi, dizel motorlarına benzer bir şekilde başlamaktadır. Ancak alev cephesinin yayılımı, benzinli motorlara benzer bir şekilde devam etmektedir (Nwafor, 2001; Sahoo et al., 2009; Pal and Tiwari, 2013). Gaz/dizel çift yakıtlı motorların yanma süreci, hem benzinli motorların hem de dizel motorların yanma karakteristiğini paylaşmakta ve yanma işlemi boyunca beş aşamadan oluşmaktadır (Ashok et al., 2015). Bu aşamalar Şekil 2.17’deki eğri üzerinde gösterilmektedir. Burada, (A-B) pilot yakıtın tutuşma gecikmesini, (B-C) pilot yakıtın yanma evresini, (C-D) ana yakıt olan gaz yakıtın tutuşma gecikmesini, (D-E) gaz yakıtın hızlı yanma evresini ve (E-F) ise art yanma evresini ifade etmektedir.



Şekil 2.17 Gaz/dizel çift yakıtlı motorlarda yanma süreci.

Çift yakıtlı çalışmada pilot yakıtın tutuşma gecikmesi, dizel ile çalışmaya kıyasla daha uzun olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, emme havasındaki O_2 konsantrasyonunun azalması ve karışım içerisindeki gazın varlığına bağlı olarak, daha düşük sıkıştırma sıcaklığına ulaşılmasından kaynaklanmaktadır. Pilot yakıtın yanma sürecinde az miktarda sıvı yakıtın kullanılması, üretilen alevin normale oranla daha küçük olmasına neden olmaktadır. Bu sayede, yanma basıncının çok daha kontrollü olarak artması sağlanmış olur. Sıkıştırma sonunda; gaz yakıt, pilot alevinin sebep olduğu ısı artışı ile ön yanmanın meydana gelebilmesi için birtakım kimyasal reaksiyona maruz kalmakta, bu da tutuşma gecikmesine sebep olmaktadır. Bu gecikmeye ve pistonun ÜÖN'ü geçmesine bağlı olarak; az miktarda basınç düşüşü görülmektedir. Ana yakıtın (gaz yakıt) hızlı yanma evresi çok değişkendir. Bunun en önemli sebebi, pilot dizel yakıtının farklı noktalarda kendiliğinden başlayan tutuşması ve alevin yayılımıdır. Bu aşamada basınç artışı hızlı olarak gerçekleşmekte, yanma odasında bulunan tüm yakıtın büyük kısmının alev alması ile basınç değeri tepe noktasına ulaşmaktadır. Genleşme aşamasında gaz yakıtın yanması devam ederken, pistonun aşağı doğru hareketi ile hacim artışı başlamaktadır. Kullanılan gaz yakıtın türüne ve ilk etapta her iki yakıtta (pilot yakıt ve ana yakıt) yaşanan tutuşma gecikmesine bağlı olarak, art yanma süreci değişken olmaktadır (Hideyuki et al., 2001; Selim, 2004; Wattanavichien, 2011).

Gaz/dizel çift yakıtlı motorlarda, ısı salınım oranının üç önemli aşaması bulunmaktadır. Bunlar; pilot dizel yakıtın yanma evresi, ana yakıt olan gazın yanma evresi ile gaz ve pilot yakıtın gecikmiş yanma evresidir. Bu evreler ve ısı artış oranları, Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Birinci aşamadaki ısı salınım artışı, çoğunlukla pilot dizel yakıtından kaynaklanmaktadır ve dizel püskürtmesine karışan gazın küçük bir kısmı da, bu artışa dâhil olabilmektedir. İkinci artış, gaz yakıtın büyük kısmının tutuşması ile elde edilirken geç yanma diye tabir edilen art yanma evresindeki küçük salınımlar ise önceki aşamalarda yanamayan pilot yakıt ve gaz yakıtların yandığı aşamadır (Bilcan vd., 2001; Goldsworthy, 2012; Ashok et al., 2015).



Şekil 2.18 Çift yakıtlı motorlarda ısı salınım oranı.

Çift yakıtlı motorlarda emme havasının gaz/hava karışımından oluşması, normal şartlarda silindire alınması beklenen hava miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durumun neticesinde ise silindir içerisindeki sıkıştırma basıncı ve buna bağlı olarak motorun ortalama efektif basıncı düşebilmektedir. Bu nedenle de, emme/hava hattının baskılanmaması veya kısıtlanmaması gerekmektedir (Mansour et al., 2001; Sahoo et al., 2009; Pal and Tiwari, 2013).

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür incelendiğinde, biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımına yönelik değişik tip ve modeldeki motorların esas alındığı görülmektedir. 1981 yılından günümüze kadar yapılan çalışmalar temelde biyogazın motorlarda tek yakıt ve çift yakıt olarak kullanılması ile ilgili olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

3.1 Biyogazın Motorlarda Tek Yakıt Olarak Kullanımı

Porpatham vd., (2008) tarafından yapılan çalışmada, CO₂'nin uzaklaştırılması ile biyogazın içeriğindeki metan miktarının zenginleştirilmesinin, buji ile ateşlemeli motorlarda performans ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. Kireç sulu gaz temizleyici kullanılarak, % 41 oranındaki CO₂ değeri sırasıyla % 30 ve % 20 değerine düşürülmüştür. 4,4 kW gücündeki bir dizel motorunun, buji ile ateşlemeli motora dönüşümü yapılarak sıkıştırma oranı 13/1'e düşürülmüştür. Testlerde motor devri 1500 min⁻¹'da sabit tutulmuştur. Yakıt olarak, içeriğinde sırasıyla % 41, % 30 ve % 20 oranında CO₂ gazı bulunan biyogaz kullanılmıştır. Temel parametre olarak; ısı verim, egzoz gaz sıcaklığı, HC, CO ve NO emisyonları ile tutuşma gecikmesi, tepe basıncı, ısı salınım oranı ve ortalama efektif basınç değerleri kullanılmıştır.

Çalışma sonucunda; biyogaz içerisindeki metan oranının artmasına bağlı olarak, motor performansında artış ve HC emisyonlarında düşüş olduğu belirtilmiştir. Daha yüksek metan oranı ve O₂ konsantrasyonu ile daha yüksek yanma hızı ve buna bağlı olarak motor çıkış gücü elde edilmiştir. Bununla birlikte termik verim de yükselmiştir. 0,95 eşdeğerlik oranında ve tam gaz keleşliği açıklığında ısı verimin % 26,2 seviyesinden, % 30 CO₂ oranında % 27,1 ve % 20 CO₂ oranında % 30,4 seviyesine çıktığı belirtilmektedir. HC emisyon değerleri incelendiğinde ise normal biyogaz kullanımında 1640 ppm olarak kaydedilen değerin, % 30 ve % 20 CO₂ oranlarında sırasıyla 1230 ppm ve 1150 ppm olduğu rapor edilmiştir (Porpatham et al., 2008)

Huang ve Crookes (1998), biyogaz ile çalıştırılan buji ile ateşlemeli motorun, farklı çalışma koşullarında performans ve emisyon değişimlerini incelemiştir. Bu amaçla, değişken sıkıştırma oranına sahip tek silindirli, Ricardo E6 laboratuvar motoru kullanılmıştır. Deneyde % 60 doğal gaz, % 40 CO₂'den oluşan simültane biyogazdan yararlanılmıştır. Doğalgaz ve CO₂ gazları ayrı ayrı tüplerden sağlanmış ve karbüratörün önüne yerleştirilen bir gaz mikserinde birleştirilmiştir. DeneySEL çalışma, farklı motor devirlerinde (1500, 2000, 2500 ve 3000 min⁻¹), farklı sıkıştırma oranlarında (8/1'den 15/1'e kadar) ve farklı ateşleme avansı değerlerinde (40 °C'den 50 °C'ye kadar) gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde;

- Biyogazın içeriğindeki CO₂ sayesinde NO_x emisyonunun azaldığı, bu durumun sıkıştırma oranının artırılmasına olanak sağladığı belirtilmektedir. Bununla beraber CO₂ oranı % 40 seviyelerine çıkarıldığında, silindir basıncının düştüğü, motor gücünün ve ısı verimin % 3 oranında azaldığı ve toplam HC emisyonunun da yükseldiği,

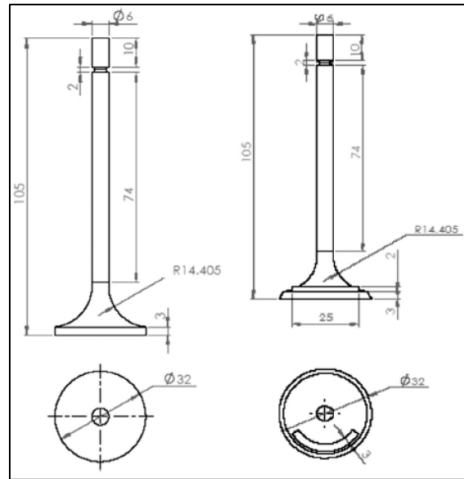
- Fakir karışımlarda yapılan testlerde, biyogazın içeriğindeki CO₂ varlığına rağmen egzoz emisyonlarındaki CO emisyonunun azaldığı ifade edilmektedir. Zengin karışım testlerinde ise bu durumun tersi olarak CO emisyonunun hızlı bir şekilde artış gösterdiği belirtilmiştir. Bu durumda CO emisyonunun, yanmayı engelleyici etkiye sahip CO₂ gazından ve hava/yakıt oranından fazlasıyla etkilendiği,

- Sıkıştırma oranının 13/1 değerine kadar artmasıyla, ısı verim ile ortalama efektif basıncının yükseldiği, 15/1 oranına doğru ise erken ateşleme/detenasyon olduğu ve artan bu sıkıştırma oranı ile NO_x, CO ve HC emisyonlarında da artış gözleendiği rapor edilmiştir (Huang and Crookes, 1998).

Arroya vd. (2014) tarafından, biyogazın katalitik ayrıştırılmasıyla elde edilen iki sentetik gazın yanma performanslarının biyogazla karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda referans yakıtı olarak benzin ve metan gazı kullanılmış ve Lamborghini marka, iki silindirli, 10,7/1 sıkıştırma

oranına sahip benzin motoru baz alınmıştır. Metan, biyogaz ve sentetik gazlar ile yapılan testler sonucunda; sabit ateşleme avansında, gazın içeriğindeki hidrojenin maksimum basıncı arttırdığı ve maksimum basınç aralığını ise biyogaz ve metana kıyasla düşürdüğü belirtilmiştir. Stokiyometrik oranda egzoz emisyonlarında, CO ve CO₂ değerlerinin arttığı da ifade edilmektedir. Bununla birlikte, sentetik gazların içeriğindeki düşük metan miktarından dolayı HC emisyonunun düştüğü belirtilirken, hidrojenin varlığından dolayı yanma sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak NO_x emisyonunun arttığı kaydedilmiştir (Arroya et al., 2014).

Porpatham vd. (2013), biyogaz ile çalıştırılan buji ile ateşlemeli motorda, girdap etkisinin motor performansına, emisyonlara ve yanmaya olan etkilerini incelemiştir. Girdap etkisini geliştirebilmek için emme subablarına, Şekil 3.1’de gösterilen bir kalıp yerleştirilmiştir. Bir girdap anemometresi ile uygun akış şartlarına göre kalıbın pozisyonu belirlenmiştir. Bu maksatla, 0,6 litre hacimli, tek silindirli, 4,4 kW gücünde, direk enjeksiyonlu dizel motorunun, buji ile ateşlemeli otto motoruna dönüşümü yapılmıştır. Söz konusu motor 9/1 ile 15/1 sıkıştırma oranı aralığında ve 1500 min⁻¹ sabit motor hızında test edilmiştir.



Şekil 3.1. Normal ve kalıp yerleştirilmiş subap görünümü (Porpatham et al., 2013).

Yanma odası içerisindeki girdap etkisinin artırılmasıyla, motor çıkış gücü ve ısı verimin yükseldiği görülmüştür. Tam gaz kelebeği açıklığında

HC emisyonlarında düşüş, NO emisyonlarında artış ve tutuşma gecikmesinin azalmasına bağlı olarak ısı salınım oranında önemli oranda artış olduğu da rapor edilmiştir (Porpatham et al., 2013).

Atık su arıtma tesisinde sürdürülebilir nitelikte bir proses ile üretilen biyogazın tesis içerisindeki gaz motorlu kojenerasyon sisteminde yakıt olarak kullanımına yönelik yapılan çalışmada (Abuşoğlu vd., 2013), sistemin termoeconomik analizi ele alınmıştır. Testlerde, dört zamanlı, buji ile ateşlemeli, 12 silindirli, Deutz TCG 2020 marka gaz motoru kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, sistemde üretilen her 1 kWh elektrik için % 60 oranında CH₄ içeriğine sahip 0,387 m³ biyogaz tüketildiğinden, 1000 kWh elektrik üretimi için biyogazın toplam tüketim maliyeti 60,22 \$ olarak bulunmuştur. Sistemde üretilen 1000 kWh elektrik üretim bedelinin 90 \$ olduğu belirlenmiştir. TEDAŞ'ın sanayi işletmelerine uyguladığı tarifenin 0,103 \$/kWh olduğu değerlendirilerek, atık su arıtma tesisi içerisindeki kojenerasyon sisteminde biyogazdan üretilen elektriğin daha ekonomik olduğu rapor edilmiştir (Abuşoğlu vd., 2013).

Porpatham vd. (2007) tarafından, biyogazın yanma karakteristiklerini iyileştirmek için küçük miktarda hidrojen gazı ilave edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Hidrojen ilavesi ile elde edilen bu karışım yakıtı, sabit devirli (1500 min⁻¹), tek silindirli, 4,4 kW gücündeki dizel motorunun buji ile ateşlemeli şekilde çalışabilecek dönüşümünün gerçekleştirilmesinin ardından denenmiştir. Bu dönüşüm neticesinde sıkıştırma oranı 13/1 olarak değiştirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde;

- Hidrojen gazının katkısı sayesinde biyogazın yanma limitlerinde düzelmeler olduğu, bu kapsamda, % 15 hidrojen ilavesi ile motor çıkış gücü ve termik verimde olumlu sonuçlar elde edildiği, ancak bunun ile birlikte ateşleme avansının vuruntunun önüne geçebilmek için geciktirilmesinin gerektiği,

- Hidrojen gazının % 10 oranında eklenmesi ile biyogazın fakir durumdaki yanma özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanarak, HC

emisyollarında önemli oranda azalma gözlemlendiği (saf biyogazın yakıt olarak kullanıldığı deneylerde HC emisyon değeri 1350 ppm ölçülürken, % 10 hidrojen ilaveli deneylerde HC emisyonu 660 ppm olarak ölçülmüştür),

- NO emisyonunda hidrojen ilavesine bağılı olarak ciddi bir değışim gözlenmemiştir. Bunun sebebinin ise biyogaz içerisindeki CO₂ gazının seyreltici özelliğinden kaynaklandığı, hidrojen ilaveli fakir karışımların ortalama efektif basınç değeriinin düştüğü, tepe basıncı ve basınç artış oranının ise hidrojen oranına bağılı olarak değışmediği yazarlar tarafından ifade edilmiştir (Porpatham et al., 2007).

Çeşitli metan oranlarına sahip biyogaz yakıtının ve bu yakıt ile birlikte hidrojen ilavesinin performans ve emisyonlara etkileri deneysel olarak incelenmiştir (Park et al., 2011). Çalışma, altı silindirli, doğal emişli buji ile ateşlemeli motorda gerçekleştirilmiştir. Biyogaza hidrojen katkı oranı % 5 ile % 30 aralığında yapılmıştır. Deneyin neticesinde, NO_x emisyonunun, hidrojen ve hava fazlalık katsayısı artışına bağılı olarak 1300 ppm'den, 200 ppm'in altına düşürülebildiği, ancak HC emisyonunun bu değışimlere tepki vermediği ifade edilmiştir.

Jeong vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, hayvansal atıklardan elde edilmiş biyogaz ile hidrojen karışımının performans değılendirmesi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan biyogazın içeriğı, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneyde kullanılan gazın özellikleri (Jeong et al., 2009).

Bileşenler	Hacimsel Oran
Metan (CH ₄)	% 60 ± 5
Karbondiyoksit (CO ₂)	% 40 ± 5
Hidrojen Sülfür (H ₂ S)	0,2 – 1 ppm
Siloksanlar ((H ₃ Si) ₂)O	0 – 3 ppm
Amonyum (NH ₃)	0,4 – 1,1 ppm

Çalışmada 2,3 litrelik, 13/1 sıkıştırma oranına sahip, buji ile ateşlemeli jeneratör motoru kullanılmıştır. Hidrojen konsantrasyonu % 0, % 5, % 10,

% 15 oranında artırılmıştır. Sonuç olarak, % 15 hidrojen ilavesinin olduğu biyogazın yanma reaksiyonu sonucunda NO_x emisyonu, % 29,26 oranında azaltılmıştır (Jeong et al., 2009).

Porpatham vd. (2012) tarafından, tek silindirli, 4,4 kW gücünde, 1500 min^{-1} sabit devirli dizel motorunun biyogaz ile çalışan buji ile ateşlemeli motora dönüşümü yapılarak, motor gücü, termik verim, egzoz sıcaklığı, HC, NO_x CO emisyonları ile ortalama basınç üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma, farklı sıkıştırma oranlarında 9,3/1, 11/1 ve 13/1 gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma oranının artışıyla çıkış gücü ve ısı verimin arttığı, HC ve NO_x seviyesinin yükseldiği belirtilmektedir. Isıl verim % 23'den % 26,8'e yükselmiştir. Bunun ile birlikte, ısı salınım oranında artış, tutuşma gecikmesinde düşüş kaydedilmiştir (Porpatham et al., 2012).

Sabit devirli dizel jeneratör motorunun buji ile ateşlemeli gaz motoruna dönüşümü yapılarak, ham biyogazın ve metan oranı zenginleştirilmiş biyogazın referans yakıt olarak seçilen doğal gaz ile kıyaslaması yapılmıştır (Chandra et al., 2011). Çalışmada, 5,9 kW gücünde, tek silindirli, hava soğutmalı bir motor kullanılmış ve deneyler 1500 min^{-1} hızında gerçekleştirilmiştir. Yakıt olarak kullanılan biyogaz, jatropa ve pongamia küspesinden elde edilmiştir. Kullanılan gazlara ilişkin özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Deneyde kullanılan gazların yakıt özellikleri (Chandra et al., 2011).

Özellikler	Doğal Gaz	Biyogaz	Ham Biyogaz
Kompozisyon (% hacimsel)	% 85 CH_4 % 7 C_2H_6 % 2 C_3H_8 % 1 N_2 % 5 CO_2	% 95 CH_4 % 3 CO_2 % 2 Diğer gazlar	% 65 CH_4 % 32 CO_2 % 3 Diğer gazlar
Alt Isıl Değ. (MJ/kg)	48	40	25
Yoğunluk	0,78	0,75	1,11
Alev Hızı (cm/s)	34	-	-
Hava /yakıt Oranı	14,5	-	-
Tutuşma Sıc. ($^{\circ}\text{C}$)	540	-	650

Dizel motorunun gaz motoruna dönüşümü kapsamında; sıkıştırma oranı şimlerle vasıtasıyla 12,65/1'e düşürülmüş ve yakıt sistemi (pompa, enjektör ve yakıt hortumları) motordan uzaklaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, doğalgazda % 31,8, metan oranı zenginleştirilmiş biyogazda % 35,6 ve ham biyogazda ise % 46,3 oranında motor gücünde azalmalar olduğu kaydedilmiştir (Chandra et al., 2011).

Siriparnakarachi ve Sucharitakul (2007) tarafından, büyük hacimli dizel otobüs motoru, çeşitli modifikasyonlar ile gaz motoruna dönüştürülmüş ve sabit devirli jeneratör haline getirilmiştir. Bu maksatla yakıt sisteminde, emme manifoldunda ve sıkıştırma oranında güncelleme ve değişimler yapılmış, motora 132 kW gücünde elektrik üretebilen bir alternatör monte edilmiştir. Testte ise 13 litrelik, 24 subaplı Hino K-13 CTI motoru kullanılmıştır. Sıkıştırma oranı 8/1'e düşürülmüş ve 1500 min⁻¹ sabit devirde tutularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Hava fazlalık oranı 0,9-1,2 olarak, ateşleme avansı 50-60 °KMA ve turbo basıncı 40-68 kPa olarak değişkenlik gösteren testlerde, NO_x ve CO emisyonlarında küçük artışların olduğu ifade edilmektedir. Turbo basıncının artırılması ile kirletici emisyonlarda daha şiddetli bir artış gözlemlendiği belirtilmiştir (Siriparnakarachi and Sucharitakul, 2007).

Raubaud ve Favrat (2005), 6 silindirli, turbo emişli, ağır iş makinası motorunu buji ile ateşlemeli ön yanmalı odalı gaz motoruna dönüştürerek kojenerasyon ünitesinde kullanmıştır. Dönüşüm sonucunda motor performans ve emisyonlarını geliştirmek maksadıyla ateşleme avansında değişim yapılması ve sıkıştırma oranının artırılması amaçlanmıştır. Bunun için dizel yakıt sistemi motordan çıkarılmış, enjektörlerin yerine bujiler yerleştirilmiştir. Buji ile yanma odası arasında kalan boşluk ile ön yanma odası teşkil edilmiştir. Gaz yakıt olarak % 40 CO₂ ve % 60 doğalgaz karışımından meydana getirilmiş simultane biyogaz kullanılmıştır. Bu karışım gazının CO ve HC emisyonlarını azaltabilmek maksadıyla % 1 oranındaki verim düşüşü göz önüne alınmış ve bu düşüşü dengeleyebilmek adına ise 12/1 olan sıkıştırma oranı, 13,3/1'e çıkarılmıştır. Sıkıştırma oranının sınırı tespit edilirken mevzuatlar çerçevesinde sınırlandırılmış NO_x ve CO emisyonlarının

sınır değerleri de göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan çalışma neticesinde, biyogazın yakıt olarak ön yanma odalı gaz motorunda kullanımında, herhangi bir emisyon düzenleyici ekipmana ihtiyaç duyulmadan yüksek verimlere ulaşılabildiği rapor edilmiştir (Raubaud and Favrat, 2005).

Subramanian vd. (2013) tarafından, içeriğindeki CO₂'nin uzaklaştırılmasıyla zenginleştirilmiş biyogazın değişken devirli motorlarda, taşıt dinamometresi kullanılarak performans ve emisyon değişimi incelenmiştir. Bu çalışmada zenginleştirilmiş biyogaz ile sıkıştırılmış doğalgaz (metan oranı % 89,14) kullanılmıştır. Çeşitli Avrupa ülkelerindeki biyogazın yakıt standartları Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Çeşitli ülkelerdeki biyogazın yakıt standartları (Huguen et al., 2010).

Özellikler	Ülkeler					
	Fransa	İsveç	Hollanda	Almanya	Avusturya	İsviçre
CH ₄ (% hacim)	96	>97	-	-	96	>96
CO ₂ (% mol)	<2,5	<4	<6	<6	<3	<6
H ₂ S (mgS/Nm ³)	<5	<15	<5	<5	<5	<5
H ₂ (% hacim)	<6	-	<10	<16	<6	<5
Merkaptan (mgS/Nm ³)	<6	-	<12	<5	<4	<4
Top.Sülfür (mgS/Nm ³)	<30	<23	<45	<30	<10	<30
O ₂ (% Hacim)	<1	<1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
H ₂ O Çiğ sıcaklığı	<-5°C	<-9 °C (200 bar)	<-10 °C (8 bar)	Ortam sıcaklığı	<-8 °C (40 bar)	<-8 °C
Wobbe İndex (MJ/Nm ³)	48,24-56,52	44,7-47,3	43,46-44,41	46,1-56,5	47,7-56,5	47,9-56,5
Isıl Değer (MJ/Nm ³)	38,52-46,08	-	31,6-38,7	30,2-47,2	38,5-46,0	38,5-47,2

Çalışma sonucunda;

- Yakıt ekonomisi açısından zenginleştirilmiş biyogaz ile sıkıştırılmış doğalgaz arasında etkili bir farkın oluşmadığı,

- CO, HC ve NO_x emisyonlarının sıkıştırılmış doğalgaza kıyasla zenginleştirilmiş biyogazda yüksek çıktığı (bununla birlikte tabi olunan Bharat Stage IV Emisyon normlarını karşıladığı), CO₂ emisyonunun her iki gaz yakıtında da aynı olduğu, anlık CO, HC ve NO_x emisyonunun şehir içi kullanım koşulunda oldukça yüksek olduğu,

- Performans ve emisyon olarak gerekli uzun süreli dayanıklılık testlerinin tamamlanmasını müteakip binek tipi araçlarda zenginleştirilmiş biyogazın yakıt olarak kullanımının mümkün olduğu, BS IV emisyon standartlarını herhangi bir donanımsal değişime gerek duymadan sağlayabildiği ifade edilmiştir (Subramanian et al., 2013).

3.2 Biyogazın Çift Yakıtlı Motorlarda Kullanılması

Felt ve Steele (1962), çift yakıtlı motorlardaki yanma kayıpları ile buji ile ateşlemeli motorlardaki vuruntu kayıplarını belirlemişlerdir. Birincil yakıt olarak gazları kullanmış, bunların vurutuya dayanıklılıklarını ve vurutuyu kontrol etmedeki etkilerini incelemişlerdir. Çift yakıtlı motorlarla, dizel motorlarının yanma diyagramları çıkarılmış, basınç-zaman diyagramlarında vuruntu ve vuruntusuz çalışma noktaları ile enjeksiyon açıları değiştirilerek, güç değişimleri incelenmiştir. Çeşitli oranlarda uygulanan propan, metan ve doğalgazın, pilot yakıt ile çalışmasında oktan numarasındaki değişiklikler bu yazarlar tarafından araştırılmıştır. Metanın çeşitli miktarda pilot yakıt ile çalıştırılmasında, 100 oktan (gaz yakıtlarda bu değer metan sayısı olarak nitelendirilmektedir) numarasından 121 oktan numarasına kadar çeşitli noktalardaki termik verim % 34,8'den % 37,8'e kadar değişmiş, doğal gaz ile yapılanlarda ise bu değer, dizel motorlarının termik verimi ile karşılaştırıldığında belirli bir yük değerinden sonra daha yüksek olduğu görülmüştür (Felt and Steele, 1962).

Karim ve Zhaoda (1988) tarafından yapılan çalışmada, gaz ve hava emme manifoldu içerisinde karıştırıldıktan sonra yanma odasına alınan ve müteakiben de sıkıştırma zamanı sonunda dizel yakıtın püskürtülmesi ile çalışan sistem geliştirilmiştir. Motor faydalı gücünün tespit edilmesine

yönelik bir analitik metot geliştirilmiştir. Büyük kapasiteli motorlarda, turbo şarjın çalışmadığı durumlarda vuruntunun nadir olarak görüldüğü ifade edilmiştir (Karim and Zhaoda, 1988).

Duc ve Wattanavichien (2007), tarımsal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan küçük boyutlu ön yanma odalı dizel motorunda çift yakıt uygulaması ile biyogazın yakıt olarak kullanımını araştırmışlardır. Çift yakıtlı motor için gereksinim duyulan modifikasyonların tamamlanmasının ardından, motor performansı, konvansiyonel dizel yakıt tüketimi ve uzun süreli kullanım sonrası motor parçalarındaki bozulma değerleri incelenmiştir. Deneylerdeki performans değerleri, motorun bağlandığı ve değişken dirençli bir alternatör vasıtasıyla ölçülmüştür. Bu çalışmada pilot yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı, ana yakıt olarak ise Ratchaburi yakınlarındaki bir domuz çiftliğinde üretilen ve yakıt özellikleri Çizelge 3.4’de verilen biyogaz kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Çiftlikte üretilen biyogazın özellikleri (Duc and Wattanavichien, 2007).

Özellikler	Değerleri
CO ₂ (% hacimsel)	% 19
N ₂ (% hacimsel)	% 6,5
O ₂ (% hacimsel)	% 1,5
CH ₄ (% hacimsel)	% 73
H ₂ S	20 ppm
Yoğunluk	0,9145 kg/m ³
Alt Isıl Değeri	26,17 MJ/kg
H/Y oranı (hacimsel)	17,23

Çalışma esnasında dizel yakıtı minimum seviyede tutacak, ancak motor güç ve torkunu düşürmeyecek oranda biyogaz ilavesi yapılarak yakıt değişim oranı tayin edilmiştir. Deneyler iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, farklı devirlerde yakıt tüketimi ve motor performansı incelenmiş, ikinci aşamada ise çift yakıtlı durumda uzun süreli kullanım testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde;

- Biyogaz/dizel çift yakıtlı motorlarda ciddi anlamda bir performans düşüşünün gözlenmediği, biyogazın yenilenebilir enerji kaynağı ve üretim maliyetinin düşüklüğü nedeniyle enerji dönüşüm maliyetinin düşük olduğu,

- Çift yakıtlı çalışmada, verimliliğin daha yüksek devir ve yüke doğru kaydığı, devir ve yük artışına bağlı olarak soğutma suyu ve yağlama yağı sıcaklıkları artarken, egzoz sıcaklığının düştüğü,

- Uzun süreli testlerde ise yağ tüketiminin çok yüksek değerlere ulaştığı ve bunun temel sebebinin mikser düzeneği tarafından yapılan vakumlamanın ve sıcaklıklardaki artışın olduğu değerlendirilmiştir (Duc and Wattanavichien, 2007).

Goto vd. (1994), yüksek termik verimi devam ettirmek ve is oluşumunu düşürebilmek maksadıyla dizel motoru çift yakıtlı (gaz/dizel) hale dönüştürmüşlerdir. Geliştirdikleri elektronik kontrollü püskürtme sistemi sayesinde çift yakıtlı çalışma ile dizel arasında ısı verim açısından anlamlı bir fark olmadığını, buna karşılık is oluşumunun azaltıldığını ifade etmişlerdir (Goto et al., 1994).

Oester ve Wallace (1987) tarafından, tek silindirli değişken sıkıştırma oranına sahip dizel motoruna sıvı propan ilavesinin etkileri incelenmiştir. Tek yakıt kullanımı sonucunda elde edilen bulgular ile karşılaştırıldığında, duman oluşumunda azalma olduğu tespit edilmiştir (Oester and Wallace, 1987).

Barik ve Murugan (2014) tarafından, farklı biyogaz miktarına bağlı olarak yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları incelenmiştir. Çalışmada ana yakıt olarak *Pongamia pinnata* bitkisi ve sığır atığından elde edilen biyogaz kullanılmıştır. Çalışmada, tek silindirli, 4,4 kW'lık dört zamanlı, hava soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Deneyler sabit devirde (1500 min^{-1}) gerçekleştirilmiştir. Motor performansının ölçülmesi amacıyla “Kirkloskar” marka elektrikli bir dinamometre, yanma odası basınç değişiminin görülebilmesi için ise “Kistler” marka basınç sensörü kullanılmıştır. Biyogazın motora düşük basınçta (1,5 bar) gönderilmesi, bir

adet düşük basınç kompresörü ile sağlanmıştır. Deneyler; Saf dizel yakıtı, Dizel yakıtı + biyogaz (0,3 kg/h), Dizel yakıtı + biyogaz (0,6 kg/h), Dizel yakıtı + biyogaz (0,9 kg/h), Dizel yakıtı + biyogaz (1,2 kg/h) karışımlarında ve % 0, % 25, %50, %75 ve % 100 motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ana yakıt olarak üretilen biyogazın % 73 oranında metan içerdiği bildirilmiştir. Deneylere başlamadan önce optimum performans ve emisyonun, dizel yakıtı ve 0,9 kg/h'lik biyogaz kullanımında elde edildiği belirtilmiştir. 0,9 kg/h'lik biyogaz akış oranında ve tam yükte, 0,215 kg/h'lik dizel yakıt tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir. Ayrıca, HC emisyonunda % 30 artış kaydedilirken; NO_x emisyonunda % 39, CO₂ emisyonunda ise % 42 ve son olarak is miktarında % 49 azalma olduğu bildirilmiştir (Barik and Murugan, 2014).

Karim (1983) tarafından, sıkıştırma ile ateşlemeli tip motorlarda, doğalgaz ve metanın kullanılması halinde yanmada, karışımın oluşturulmasında ve bu karışımın dağıtımında meydana gelebilecek ortak sorunların çözümü araştırılmıştır. Bu sorunların üstesinden gelinmesi durumunda yüksek verim, güç üretimi ve daha temiz egzoz emisyonu gibi pozitif etkilerinden dolayı gelecekte ilgi uyandırabilecek bir sistem olduğu değerlendirilmiştir (Karim, 1983).

Barut (1997), iki farklı gaz yakıt besleme sisteminin çift yakıtlı çalışmaya etkilerini incelemiştir. Bu farklı düzenekler ile motor torkunda ve motor gücünde % 2,5 oranında bir artışın olduğu, partikül madde emisyonunda ise % 60 azalma elde edildiği bildirilmiştir (Barut, 1997).

Papagiannakis ve Hountalas (2003) tarafından bu çalışmada, motor performansı ve egzoz emisyonları açısından çift yakıt karakteristiklerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Çift yakıt kapsamında, pilot yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı kullanılırken, ana yakıt olarak şebeke gaz hattından temin edilen ve içeriğinde % 98 CH₄ içeren doğalgaz kullanılmıştır. Çalışmada tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Değişken motor yüküne bağlı sabit avans ve sabit giriş sıcaklığında yapılan deneylerde;

- Çift yakıtlı çalışma esnasında, dizel yakıta kıyasla daha uzun tutuşma gecikmesi, gaz yakıtların daha düşük silindir tepe basıncı ürettiği, yanma odası içerisindeki ısı salınım oranının da düştüğü, çift yakıtlı çalışma durumunda özgül yakıt tüketiminin arttığı, ara yüklerde ise bu tüketim değerinin daha da yükseldiği,

- Egzoz emisyonları açısından incelendiğinde, NO_x emisyonlarının azaltılmasında olumlu etki sağlarken, HC ve CO emisyonlarının arttığının gözlemlendiği, yüksek motor yüklerinde ve yüksek doğal gaz kütlesinin kullanıldığı deneylerde ise bu emisyon değerlerinde düşmeler olduğu, egzoz emisyonlarında en büyük değişimin is emisyonunun azaltılması olarak kaydedildiği bildirilmiştir (Papagiannakis and Hauntalas, 2003).

Carlucci vd. (2008) tarafından, tek silindirli dizel motorunun çift yakıtlı çalışabilecek şekilde dönüşümünün yapıldığı bir çalışmada, sıkıştırılmış doğal gaz ile enjektör püskürtme basıncı ve püskürtme miktarının farklı çalışma koşullarında yanma ve emisyonlar açısından incelenmesi amaçlanmıştır. Doğal gazın motorun emme sistemine girişi, piezo resistive sensör ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde, metan gaz ve sıvı yakıt enjektörlerinin akımları ve püskürtme basınçları ölçülmüştür. Motor performansı, emisyon değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, NO_x , CO ve HC emisyonları ölçülmüştür. Ayrıca emisyon değerleri kapsamında is oluşumu (duman koyuluğu) değerlendirmeye alınmıştır. Çalışma sonucunda;

- Isı salınım oranı analizinde, püskürtme parametrelerinin, emisyonlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, çift yakıtlı çalışma ile partikül madde emisyonunun azaldığı,

- NO_x , CO ve HC emisyonlarının analizinde ise pilot yakıt miktarı kadar, yakıt jetinin nüfusunun da aynı öneme sahip olduğu değerlendirilmiştir (Carlucci et al., 2008).

Hindistan'da bulunan Sichuan firması tarafından (1979), biyogazın kullanımına yönelik çeşitli gaz yakıcılarının dizaynı ve motorlarda

kullanımına yönelik araştırmalar yapılmıştır. Özellikle hava/yakıt oranı ve karışım sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda, delik sayısının artırılması ile diğerk tip karıştırıcılara kıyasla yakıt sarfiyatında düşüş olacağı ifade edilmiştir (Sichuan, 1979).

Karim ve Wierzba (1983), yaptıkları diğerk bir çalışmada, yakıt olarak metan ile propanı hem otto motorlarında hem de diesel motorlarında deneysel olarak incelemişlerdir. Bu inceleme esnasında temel olarak, çıkış gücü, verim, emisyon, erken ateşleme ve vurutu yatkınlığı ile bu gazların düşük giriş sıcaklık değerleri esas alınmıştır. Çalışma neticesinde, metan gazının propana oranla fiziksel, kimyasal ve yanma karakteristikleri bakımından daha iyi bir yakıt olduğu değerlendirilmiştir. Metan gazının değerliş giriş sıcaklıklarında (34, 72 ve 154 °C), daha düşük kompresyon oranlarında vurutuya başladığı tespit edilmiştir (Karim and Wierzbe, 1983).

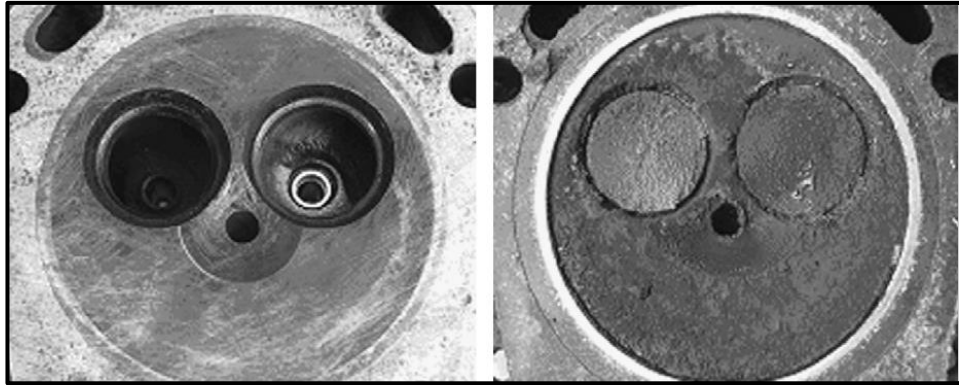
Papagiannakis vd. (2010) tarafından, çift yakıtlı çalışma koşullarında farklı dizel yakıtı ve doğal gaz karışımlarındaki hava/yakıt oranının motor verimine ve egzoz emisyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, dört zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı ve doğal emişli dizel motoru kullanılmıştır. Doğal gaz bir mikser ve akış metre düzeneği kullanılarak motorun emiş hattına eklenmiştir. Emisyon olarak ise, is miktarı, NO_x, CO ve HC emisyonları yazarlar tarafından değerlendirmeye alınmıştır. Deneyler, 1500, 2000 ve 2500 min⁻¹ ve 1,2, 2,4, 3,7 ve 4,9 bar'lık ortalama efektif basınçlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde;

- Çift yakıtlı çalışmada, dizel/doğal gaz yakıt değerlişim oranındaki artışın sebep olduğu toplam hava/yakıt oranındaki düşüşün motor termik verimini de düşürdüğu, bu bozulmanın özellikle düşük ve orta yüklerde daha belirgin olduğu,

- Ayrıca, dizel yakıt değerlişim oranındaki artışın NO emisyonunda önemli bir azalmaya sebep olduğu, yüksek devirlerde bu olumlu etkinin daha açık hale geldiği,

- Çift yakıtlı çalışmada, is emisyonunda özellikle yüksek yüklerde ciddi düşüşün tespit edildiği, CO emisyonunun ise yakıt değişim oranının değişimine bağlı olarak artış gösterdiği, benzer şekilde HC emisyonunun da yakıt değişim oranının artışına bağlı olarak arttığı rapor edilmiştir (Papagiannakis et al., 2010).

Tippayawang vd. (2007), bu çalışmada; tek silindirli, dört zamanlı, normal emişli ve direk püskürtmeli dizel motoru kullanmıştır. Bu motora 5 kW'lık bir alternatör, dinamometre görevini görmesi için bağlanmıştır. Deney düzeneğinin yakınında bulunan hayvan çiftliğindeki biyogaz tesisinden elde edilen biyogaz, basit bir mikser düzeneği kullanılarak motorun emme havasına bağlanmıştır. Bu sayede çift yakıtlı olarak motor çalıştırılmıştır. İlk olarak motor 24 saat boyunca dizel yakıtı ile çalıştırılmıştır. 1400 min^{-1} 30 dakika boyunca stabilizasyon amaçlı olarak çalıştırıldıktan sonra sabit hız testine geçilmiştir. Hem dizel hem de biyogaz/dizel çift yakıtlı olarak test yapılmıştır. Motor yükünün artırılmasına bağlı olarak yapılan testlerde pilot yakıt sabit tutulmuş, güç artışı için biyogaz miktarı artırılmıştır. Motor ilk 200 saat boyunca yüksüz olarak çalıştırılmış ve motor parçaları üzerindeki olası etkiler gözlenmiştir. Deneme süresi sonucunda tüm önemli motor parçaları sökülerek yazarlar tarafından incelenmiştir. İnceleme neticesinde, parçalarda yüksek oranda nem olduğu ve yanma odasına yakın motor parçalarında karbon birikimi meydana geldiği not edilmiştir. Karbon birikintileri ve nem durumu Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Yanma odası içerisinde karbon ve nem oluşumu (Tippayawong et al., 2007).

Kısa süreli çalışmada düşük motor hızlarında biyogaz, sıvı dizel yakıtına göre daha kolay homojenize olabildiğinden biyogazın çıkış gücü de daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Normal emişli bu dizel motorunda, 2000 min⁻¹'nin üzerine çıkıldığında ise emisyonların ve performansın kötüleştiği rapor edilmiştir. Bunun sebebi ise gaz basıncının düşük olmasına (100-150 Pa) bağlanmıştır. Emme esnasında oluşan vakum etkisinden dolayı yüksek hızlarda gaz/hava karışımının yeterli miktarda içeri alınamadığı değerlendirilmiştir. Bununla birlikte yüksek hızlara çıkıldığında biyogazın, motorun volümetrik verimini düşürdüğü belirtilmektedir. Çalışma esnasında maksimum termik verim 1500 min⁻¹'da, % 23 olarak tespit edilmiştir. 200 ve 500 saatlik kontrol amaçlı yapılan çalışmaların ardından, 2000 saatlik uzun süreli testlere geçilmiştir. Bu testlerde 200-250 saatlik fasılalardaki rutin bakım ve kontrollerin dışında motor durdurulmadan devam edilmiştir. Sürenin dolmasının ardından motorun tüm parçaları sökülerek aşınma miktarları tespit edilmiştir. İncelenen parçalarda sadece aşınma değil, aynı zamanda karbon birikimi ve korozyonun da olduğu bildirilmiştir. En fazla aşınmanın emme ve egzoz subaplarında, 1-2-3. kompresyon segmanlarında, yağ segmanında ve biyel kolu yataklarında olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; en fazla aşınma miktarının % 20,9 oran ile biyel kol muylusu yatağında gerçekleştiği ve bunun % 0,5 ile % 4,3 arasında değişen oranlarda diğer parçalarda olduğu bildirilmiştir. Parçalarda meydana gelen karbon birikintisi, aşınma ve korozyonların motorun çıkış gücünde bir düşmeye neden olmadığı değerlendirilmiştir (Tippayawong et al., 2007).

Bedoya vd. (2009) tarafından yapılan bu çalışmada, güç jeneratörleri için çift yakıtlı sıkıştırma ile ateşlemeli motorların çeşitli biyogaz karışım sistemleri ve pilot yakıt miktarına bağlı sonuçları tartışılmıştır. Deneylerde 15,5/1 sıkıştırma oranına sahip, 20 kW gücünde dizel motoru kullanılmıştır. Birinci aşamada pilot yakıtı olarak konvansiyonel dizel, ikinci aşamada ise pilot yakıtı olarak palm yağı metil ester kullanılmıştır. Deneylerde simultane biyogaz (% 60 doğalgaz ve % 40 CO₂ karışımı) ana yakıt olarak kullanılmıştır. Deneyde kullanılan tüm yakıtların yakıt özellikleri, Çizelge 3.5'de verilmiştir.

İlk olarak kısmi yükte motorun stabil çalışmasına olanak verecek olan maksimum yakıt değiştirme oranı tanımlanmıştır. Deneyler % 40, 50, 70 ve 100 yüklerde gerçekleştirilmiştir. Çift yakıtlı modda, dizel pilot yakıtıyla belirtilen yüklerde motor çalıştırıldığında, maksimum yakıt değişim oranı % 70 belirlenmiştir.

Çizelge 3.5 Deney yakıtlarının genel özellikleri (Bedoya et al., 2009).

	Dizel	Biyodizel	Biyogaz
Alt Isıl Değer (Mj/kg)	43	39,55	23,73
Setan Sayısı	44	57	160 (metan sayısı)
Stokiyometrik H/Y	14,32	12,55	6,05

İkinci deneysel çalışmada, süperşarj, keniks mikser ve daha uzun karışım yolu (250 mm) ile modifiye edilmiştir. Süperşarj basıncı kontrol valfi kullanılarak 85 mbar'a sabitlenmiştir. İçinde spiral kanatçıkların olduğu ve her birinin 180 derece dönebildiği keniks mikser daha homojen bir karışım elde etmek için kullanılmıştır. Aynı yüklerde pilot yakıt olarak palm yağı metil ester kullanılmıştır. Isıl verim, hacimsel verim, yakıt hava oranı, CO ve HC emisyonları, silindir basınç miktarları, krank açısı ile bağlantılı toplam ısı salınım miktarı, tutuşma gecikmesi ve maksimum yer değişim seviyesi sonuçları karşılaştırılarak motor performansı değerlendirilmiştir.

Değerlendirilen yük oranlarında keniks mikser ve süperşarjer kullanılan deneylerde ısı verim % 8 artmıştır. Volumetrik verimlerde % 6 civarında düşüş gözlenmiştir. Kenix mikser ve uzun karışım yolunun emme manifoldunda basınç düşmesine sebep olmasından kaynaklandığı yazarlar tarafından değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yanma odası basıncı tepe değeri % 10 oranında daha fazla ve ÜÖN'ya daha yakın olarak gerçekleşmiştir. Tutuşma gecikmesi % 50 yükte 2,7 °CA ve % 100 yükte ise 3,2 °CA olmuştur. Bu durumun, pilot yakıtın püskürtülmesi sırasındaki sıcaklık artışı, biyodizelin yüksek setan sayısı ve tutuşma gecikmesi periyodundaki yüksek O₂ miktarından ileri geldiği değerlendirilmektedir (Bedoya et al., 2009).

Henham ve Makkar (1998), biyogaz içerisindeki metan miktarı değişiminin çift yakıtlı motorlarda yanmaya olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyde çift silindirli, dört zamanlı, endirek enjeksiyonlu dizel motoru kullanılmıştır. Pilot yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı kullanılırken, değişken bir CO_2/CH_4 oranı sağlayabilmek için simultane biyogaz (doğalgaz ve CO_2 gazı karışımı) kullanılmıştır. Gaz hattı, motorun emiş hattına “T” mikser düzeneği vasıtasıyla bağlanmıştır. Çalışma sonucunda;

- % 60 oranında dizel/doğal değişim oranının vuruntusuz çalışma için sınır olarak belirlendiği,

- CO_2 katkısının artışı ve yakıt değişim oranının artması ile tüm aşamadaki verimlerin düştüğü, özellikle yüksek hızlarda bu düşüşün daha etkili olduğu, egzoz sıcaklığının CO_2 katkısından ziyade doğalgaz değişim oranından daha çok etkilendiği, egzoz emisyonlarından, CO emisyonunun gaz kalitesinden ziyade yakıt değişim oranından etkilendiği, çift yakıtlı çalışmada, yanma odası basınç artışının daha hızlı olduğu değerlendirilmiştir (Henham et al., 1998).

Ehsan ve Bhuiyan (2010), yapmış oldukları bu çalışmada, çift yakıtlı bir dizel/doğalgaz motorunun performans ve emisyon değişimi ile ekonomikliğini araştırmıştır. Araştırmacılar, deneylerinde, tek silindirli, su soğutmalı, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu dizel motoru kullanmıştır. Çalışmalar, sabit devirde, sulu tip bir dinamometre ile hava, dizel yakıtı ve doğalgaz akışı kontrol edilerek yapılmıştır. Çalışma sonucunda;

- Doğalgaz ana yakıtlı ve dizel pilot yakıtlı sistemin, % 90 ve % 88 yakıt değişim oranlarında normal dizel çalışma durumuna çok yakın performans sergilediği, ara yüklerde, vuruntu olmaksızın % 90’na kadar dizel/doğalgaz değişimine ulaşılrken, termik verimin buna bağlı olarak düştüğü,

- Püskürtme avansının sabit tutulmasıyla, doğalgaz/hava karışımının alev hızının düşük olması sebebiyle yanmanın geciktiği ve sonuç olarak da egzoz gaz sıcaklığının arttığı, bununla birlikte egzoz subabı sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı ve yağlama yağı sıcaklığında önemli bir artışın gözlenmediği,

- % 90 motor yükünde, % 88 yakıt değişim oranında maksimum ekonomik faydanın sağlandığı tespit edilmiştir (Ehsa and Bhuiyen, 2010).

Tippayawang vd. (2010) bu çalışmada, biyogaz/dizel çift yakıtlı motorun uzun süreli kullanımına bağlı performans ve dayanım özelliklerini ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Yazarların ana hedefi ise, doğal emişli ve direkt enjeksiyonlu bu motorun aşını karakteristikleri ile yağlama yağındaki değişimlerin değerlendirilmesidir. Deneyde; tek silindirli, su soğutmalı, 18/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Test motoru, değişken yüklü alternatörle birleştirilmiştir. Pilot yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı, ana yakıt olarak ise domuz çiftliğinden elde edilen biyogaz kullanılmıştır. Kullanılan biyogazın içeriği ve yakıt özellikleri, Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6 Biyogaz bileşenleri (Tippayawong et al., 2010).

Bileşenler	%
CH ₄	66
CO ₂	26
N ₂	6
O ₂	2

Testler esnasında deney motoru 1500 min⁻¹ hızda, günde 24 saat ve 6 ayda toplam 3500 saat çalıştırılmıştır. Bu süreçte 200-250 saat aralıklarda motor yağ değişimi ve üretici firma bakımları yapılmıştır. Motor yağı numuneleri motor durdurulmadan alınarak kontroller yapılırken, 500, 900, 2000 ve 3500 saatlik çalışmalarda ise parçalar sökülerek incelemeler yapılmıştır. Yapılan bu değerlendirmeler neticesinde;

- Silindir iç yüzeylerinde çok önemsenmeyecek miktarda karbon birikintisi olduğu, yüzdesel kütle kaybı olarak tanımlanan aşıntı oranının biyel muylu yatakları haricinde düşük olduğu,

- Yağ örneklerinde düşük konsantrasyonlarda metal elementler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu elementlerin test süresi ile orantılı olarak arttığı, yağ analizi, vizkozite, oksidasyon gibi özelliklerinde düşüş olduğu belirtilmiştir. Bununla beraber, sıradışı metal aşıntı parçacıkları ve yağ bozulmalarının gözlenmediği saptanmıştır (Tippayawong et al., 2010).

Makareviciene vd. (2013), farklı CH_4/CO_2 oranlarına sahip üç farklı biyogazın etkilerini incelemişlerdir. İki aşamalı yapılan deneylerin birinci aşamasında; farklı biyogaz kompozisyonlarının ve EGR sisteminin motor parametrelerine etkileri incelenmiştir. İkinci aşamada ise, yüksek metan oranına sahip olan gaz kullanılarak, püskürtme süresine ve püskürtme başlangıcına etkileri araştırılmıştır. Deneyde, dört silindirli, dört zamanlı, 19,5/1 sıkıştırma oranlı ve 66 kW'lık, 2000-2500 min^{-1} da 180 Nm tork, ortalama efektif basıncı 1,19 MPa (180 Nm de), turbo şarjlı, direk enjeksiyonlu ve elektronik kontrollü BOSCH VP37 distribütör tipi pompalı dizel motoru kullanılmıştır. Egzoz gazlarının azaltılması için EGR ünitesi dizayn edilmiştir. Deneyler esnasında, püskürtme zamanı başlangıcı elektromanyetik kontrol valfi motor ECU'süyle olan bağlantı koparılmış ve ayrı bir akış kontrol jeneratörü ile kontrol edilmiştir. ECU'nün hata vermemesi için, pompadan çıkarılan farklı bir elektromanyetik kontrol valfine (püskürtme başlangıcı) bağlanmıştır. Gerçek enjeksiyon başlangıcı AVL DiSystem 845 ile kaydedilmiştir. EGR'siz çalışma sürecinde NO_x seviyesinin dışında daha düşük kirletici miktarı ölçülmüştür. Bununla beraber NO_x konsantrasyonu, biyogazın yakıt olarak kullanımı ile düşmüştür. Çünkü biyogazın içerisinde bulunan metan yanma süresini uzatırken, CO_2 ise yanabilir karışımın maksimum sıcaklığını düşürmektedir. Bu sayede maksimum yanma sıcaklığı da düşürülmüş olunur. NO_x konsantrasyonundaki düşüşün, direk olarak genel yakıt miktarı içerisindeki metan konsantrasyonu ile ilgili olduğu ifade edilmiştir.

Artan motor yükleri açısından bakıldığında, EGR sistemi çalışmasında CO_2 konsantrasyonu doğrusal olarak çok değişmemiştir. Çünkü EGR kontrol sistemi, CO_2 'yi etkilememektedir. Bununla beraber EGR sistemi kapatıldığında, CO_2 konsantrasyonu tam olarak doğrusal yol izlemektedir. EGR kapatıldığında, egzozdaki CO_2 emisyonu iki kat düşük çıkmıştır. Bununla birlikte, egzozdaki CO_2 'nin, biyogazın içerisindeki CO_2 miktarına bağlı olduğu bildirilmekte ve bundan dolayı da düşük metan konsantrasyonuna sahip biyogaz kullanıldığında CO_2 konsantrasyonunun yükseleceği açıklanmaktadır. Biyogaz desteği ve EGR'nin devrede olduğu durumda, CO emisyonunda, saf dizel yakıtı kullanılarak ölçülen CO emisyonuna kıyasla 3-20 kat aralığında değişen çarpıcı bir yükseliş olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, biyogazın ve egzoz gazının içeriğindeki CO_2 , karışım içerisindeki O_2 miktarını azalttığı için elde edilmiştir. Ancak EGR sistemi devre dışı bırakıldığında yakıt içerisindeki karbon daha etkili ve verimli bir şekilde yandığından (çünkü hava/yakıt oranı daha yüksek), egzozdaki CO kirletici payı EGR'li çalışma şartlarına oranla 3 kat az olmuştur.

Biyogazın bir motorda kullanımı için, EGR, püskürtme avansı gibi bazı modifikasyonlara ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir. Eğer gaz motorda herhangi bir modifikasyon yapılmadan kullanılmak istenir ise, toplam yakıt tüketiminin artacağı, termik verimin düşeceği, egzozdaki kirletici konsantrasyonların da (NO_x hariç) artacağı bildirilmektedir. EGR sistemi devre dışı bırakıldığında, hava/yakıt oranının artacağı, duman koyuluğu, CO ve HC konsantrasyonlarının düşeceği ancak NO_x emisyonunun yükseleceği belirtilmiştir. Bu pozitif sonuçlara karşın, yüksek hava/yakıt oranı, yüksek yakıt tüketimi ve düşük ısı verim ile sonuçlandığı ifade edilmiştir.

Ortak yakıt karışımı içerisindeki metan bileşeni artırılırken, dizel yakıtının püskürtme avansı; yakıt tüketimini, egzozdaki duman koyuluğunu, HC ve CO emisyonlarını azaltmak için devamlı olarak arttırılmıştır. Bununla birlikte, püskürtme avansının artırılması, NO_x emisyonunu da arttırdığı ifade edilmiştir. Bu çalışma ile 60 Nm (ortalama efektif basınç 0,6 MPa) torkta, 2500 min⁻¹ de çalıştıran % 30 metan bileşimli gaz akışında (% 95 metan ve 30

l/dk debide), saf dizel motoruyla aynı parametrelerde elde edilen ısı verime ve egzoz emisyonlarına yakın değerler elde edilebileceğini ifade edilmiştir. Bununla birlikte dizel yakıt tüketiminin düşürülebildiği ve önemsiz CO ve HC artışlarına nazaran NO_x emisyonunun 1,5 kat azaltılacağı bildirilmiştir (Makarevşçence et al., 2013).

Bora vd. (2014) tarafından, 3,5 kW'lık tek silindirli, su soğutmalı, değişken sıkıştırma oranına sahip dizel motorun emme manifolduna bir mikser düzeneği ilave ederek çift yakıt performans ve emisyonları incelenmiştir. Çift yakıt düzeneğinde ana yakıt olarak biyogaz, pilot yakıt olarak ise dizel yakıtı kullanılmıştır. Çalışma, farklı motor yükü (% 20, % 40, % 60, % 80 ve % 100) ve farklı sıkıştırma oranlarında (18/1, 17,5/1, 17/1 ve 16/1) ve 23° lik sabit püskürtme avansında yapılmıştır. Sıkıştırma oranı, motor durdurulmadan ve yanma odası geometrisi modifiye edilmeden değiştirilmiştir. Deney düzeneğinde, biri silindir kapağında, diğeri yakıt enjektöründe olmak üzere iki adet piezo sensör, yanma basıncını ve yakıt hattı basıncını ölçmek üzere kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan dizel ve biyogaz yakıtlarının yakıt özellikleri Çizelge 3.7'de sunulmuştur. Deneyde kullanılan biyogaz 3 m³'lük bir reaktörde sıgır atığından elde edilmiştir.

Çizelge 3.7 Dizel ve biyogazın özellikleri (Bora et al., 2014).

Özellikler	Dizel	Biyogaz
Kimyasal Bileşim	C ₁₂ H ₂₆	% 60 CH ₄ + % 40 CO ₂
Yoğunluk (kg/m ³)	840	0,91
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42	20,67
Setan Sayısı	45-55	-
Tutuşma Sıcaklığı (K)	553	1087
Stokiyometrik H/Y Oranı	14,92	10

Çalışma sonucunda;

- Termik verimin, 16/1 sıkıştırma oranında % 16,42, 18/1 sıkıştırma oranında % 20,04 olduğu, ancak dizel tek yakıtlı (17,5/1 sıkıştırma oranında) termik verimin % 27,76 olduğu,

- En yüksek pilot yakıt tasarrufunun 18/1 sıkıştırma oranında % 79,46 ile elde edildiği ve sıkıştırma oranının düşmesine bağlı olarak dizel yakıt değişim oranının düştüğü,

- 16/1'den 18/1'e kadar değişen sıkıştırma oranlarındaki emisyon değişimlerinde, CO ve HC emisyonlarının sırasıyla % 26,22 ve % 41,97'ye kadar azaldığının gözlemlendiği, bununla birlikte sıkıştırma oranındaki değişime bağlı olarak NO_x emisyonunda % 66,65, CO₂ emisyonunda da % 27,18 artışın olduğu belirtilmiştir (Bora et al., 2014).

Wierzbicki vd. (2012) tarafından, çift yakıtlı çalışmada yanma odasına sıkıştırılan metan/hava karışımını tutuşturabilecek en düşük pilot yakıt miktarının tespit edilmesine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, tek silindirli, 21/1 sıkıştırma oranına sahip, 6,8 kW gücünde, hava soğutmalı dizel motoru kullanılmıştır. Ana yakıt olarak CH₄ gazı ve pilot yakıt olarak da konvansiyonel dizel yakıtı tercih edilmiştir. Kullanılan deney motorunun mekanik yakıt sistemi sökülerek yerine common rail yakıt sistemi yerleştirilmiştir. Aynı şekilde standart mekanik enjektörler, eş nozul özelliklerine sahip elektromekanik enjektör ile değiştirilmiştir. Çalışmaya ilişkin olarak, özellikle enjektör parametrelerine yönelik kontroller geliştirilmiştir. Buna göre, enjektör açık kalma süresi (10 µs ayar aralığı), enjektör püskürtme avansı (0,5° KMA ölçüm aralığı), püskürtülecek yakıtın dört eşit parçaya bölünerek püskürtülmesi ve her bir parçanın püskürtme süresi ve püskürtme başlangıcının kontrol edilmesine yönelik test düzeneği oluşturulmuştur. Deney sonucunda, % 80 yakıt değişim oranının en iyi yanma performansını sağladığı, bunun üzerindeki yakıt değişimlerinde yanmanın uzamasına sebep olduğundan enerji kayıplarının artmaya başladığı saptanmıştır (Wierzbicki et al., 2012).

Galal vd. (2002) tarafından, çift yakıtlı motorun performans ve emisyon değerleri ile egzoz sıcaklığı, tutuşma gecikmesi gibi parametrelerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma neticesinde; motorun stabil çalışması için % 25 pilot yakıt miktarının yeterli olduğu, bu çalışma kapsamında çift yakıtlı motordaki optimum sıkıştırma oranının normal dizel motorunun

sıkıştırma oranından daha düşük olduğu ve bu değerin 16,5/1 olduğu bildirilmiştir. Çift yakıtlı çalışmadaki tutuşma gecikmesinin çok daha uzun olduğu, termik verimin ve özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtının sahip olduğu değerlere yakın olduğu bildirilmiştir. CO emisyonunun artan hava/yakıt oranına bağlı olarak azaldığı, NO_x emisyonunun dizel çalışmaya benzer bir görüntü sergilediği rapor edilmiştir (Galal et al., 2002).

Luijten ve Kerkof (2011) tarafından yapılan çalışmada, kırsal kesimde elektrik üretiminde konvansiyonel dizel yakıtına olan bağımlılığı azaltabilmek için saf jatropha yağı ve biyogaz (simultane) kullanımının performans açısından değerlendirilmesini amaçlanmıştır. Bu maksatla, direk enjeksiyonlu, dört zamanlı, tek silindirli, 17/1 sıkıştırma oranına sahip, doğal emişli dizel motoru kullanılmıştır. Yükleme bir alternatör ve yük bankası kullanılarak sağlanmıştır. Simultane biyogazın hava ile karışması emme manifolduna yerleştirilen bir mikser düzeneği ile sağlanmıştır. Deneyler, sabit devirde ve değişken yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı CH₄/CO₂ oranına sahip simultane biyogaz örnekleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; düşük yüklerde termik verimin düştüğü gözlenmiştir. Bu düşüşün biyogaz içeriğindeki metan oranından bağımsız olarak gerçekleştiği bilinmektedir. Bununla birlikte biyogaz içerisindeki CO₂ artışının volümetrik verimi etkilediği yapılan deneysel çalışmalarla kanıtlanmıştır. Jatropha yağı ve biyogazın, kırsal kesim elektrik ihtiyacının karşılanmasında ve konvansiyonel dizel yakıtının yerine kullanılabileceği değerlendirilmiştir (Luijten and Kerkhof, 2011).

Yoon ve Lee (2011) tarafından, tek yakıtlı (dizel/biyodizel) ve çift yakıtlı (biyogaz-dizel, biyogaz-biyodizel) motorda, çeşitli çalışma koşullarında yanma ve emisyon karakteristiklerinin analizi hedeflenmiştir. Deneyde, dört silindirli, dört zamanlı, turbo emişli, su soğutmalı ve 19/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Biyogazın sisteme ilave edilerek çift yakıt dönüşümü için emme manifolduna iki adet selenoid valfli gaz enjektör kullanılmıştır. Gaz yakıt olarak organik atıkların anaerobik fermantasyonu ile üretilen ve sonrasında temizlik işlemine tabi tutulan biyogaz kullanılmıştır. Biyogazın içeriği ve yakıt özellikleri, Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8 Biyogazın kimyasal bileşimi ve yakıt özellikleri (Yoon and Lee, 2011)

Özellik	Değer
Metan (% hacimsel)	30-73
Karbondiyoksit (% hacimsel)	20-40
Nitrojen (% hacimsel)	5-40
Hidrojen (% hacimsel)	1-3
Yoğunluk (kg/m ³)	0,65-0,91
Oktan sayısı	130
Tutuşma sıcaklığı (°C)	632-813
H/Y oranı (hacimsel)	17,2
Alt ısı değeri (MJ/kg)	26,17

Deneylerde pilot yakıt olarak konvansiyonel dizel yakıtı ve soya fasulyesi metil esteri kullanılmıştır. Testler 2000 min⁻¹ sabit motor hızında gerçekleştirilmiştir. Çift yakıtlı çalışmanın yanma ve emisyonlar üzerine etkilerine dayalı deney sonuçları incelendiğinde; % 20 motor yükü altında, biyogaz-biyodizel çift yakıtlısının, biyogaz-dizel çift yakıtlısına oranla daha düşük yanma basıncı ve ısı salınım oranı ortaya çıktığı belirtilmektedir. % 60 motor yükünde ise biyogaz-biyodizel çift yakıtlısının daha yüksek yanma odası tepe basıncı, ısı salınım oranı ve ortalama efektif basınç değerlerinin tespit edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin biyogaz-biyodizel çift yakıtlının da daha kısa olduğu da bulguların arasında yer almaktadır.

Biyogazın özgül ısı kapasitesinin deneydeki diğer yakıtlardan daha yüksek olması ve gaz/hava karışımının dolgu sıcaklığındaki düşüş nedeniyle tüm çift yakıtlı koşullarda tutuşma gecikmesinin tek yakıtlı koşullara göre daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Sahip olduğu yüksek setan sayısı ve bileşimindeki oksijen nedeniyle biyodizel, hem tek yakıt hem de çift yakıt koşullarında dizel yakıtından daha kısa tutuşma gecikmesi kaydedilmesine sebep olmaktadır. Egzoz gaz sıcaklığı, artan motor yüküne göre yapılan deneylerde çift yakıtlı çalışma koşullarında, tek yakıtlıya göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak düşük dolgu sıcaklığı ve beraberindeki yanma gecikmesi gösterilmektedir. % 20 ve % 40 motor yüklerinde, çift yakıtlı koşullarındaki toplam özgül yakıt tüketimi, tek yakıtlı koşullara göre daha yüksek olarak gerçekleşmektedir. % 80 motor yükünün

üzerindeki durumlarda ise biyogaz-dizel/biyodizel değişim oranının artması nedeniyle toplam özgül yakıt tüketiminin iyileştiği rapor edilmiştir.

Çift yakıtlı çalışmada ve her iki pilot yakıtta da NO_x emisyonunun önemli oranda düştüğü tespit edilmiştir. Biyodizelin daha düşük stokiometrik H/Y oranına ihtiyaç duyması, bileşimindeki O_2 'nin varlığı, düşük sülfür içeriği ve bileşiminde aromatik bulunmaması nedeniyle özellikle biyogaz-biyodizel çift yakıtlı durum başta olmak üzere is emisyonu önemli derecede azaldığı belirtilmektedir. Çift yakıtın tüm koşullarında, tek yakıtla oranla daha yüksek HC ve CO emisyonları tespit edilmiştir. Yanma odasına gönderilen biyogaz miktarı arttıkça içeriğinde bulunan CO_2 gazının da etkisiyle yanmamış emisyonların artmasına neden olduğu ifade edilmiştir (Yoon and Lee, 2011).

Park vd. (2014) tarafından, biyogaz ve dimetileter (DME) çift yakıtlısının motorlarda emisyon ve performans değişimi üzerine etkileri çalışılmıştır. Bu nedenle, tek silindirli, yüksek devirli, common rail yakıt sistemine ve 17,8/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Bu dizel motoruna 55 kWh'lık bir DC dinamometre eklenerek motor hızı kontrol altına alınmıştır. Ayrıca bir basınç sensörü yanma odasında bulunan kızdırma bujisinin yerine takılarak yanma odası basıncı değişimi kayıt altına alınmıştır. Biyogazın emme havası ile karışımını sağlayabilmek için emme manifolduna çalışma basıncı 0,4 MPa olan bir adet enjektör eklenmiştir. Atmosferik şartlarda buharlaşan DME'i 0,6 MPa basınca kadar sıkıştırarak sıvı halde kalması sağlanmıştır. Yanma odasına bu sıvı haliyle püskürtülmesi sağlanmıştır. Ayrıca, DME'nin yağlama kabiliyetini artırabilmek için 1000 ppm seviyesinde yağlama geliştirici ilave edilmiştir. Deneysel çalışma esnasında motor devri 1200 min^{-1} da sabit tutulmuştur. Yanma basıncı ve ısı salınım oranı 10'ar derecelik değişimlerle 40°KMA değerine kadar değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda;

- Karışım oranındaki biyogaz miktarının artmasıyla yanma sonu tepe basıncında ve ısı salınım oranında düşüş olduğu, enjeksiyon zamanı ve tutuşmanın başladığı zaman açısından yapılan değerlendirmede, DME-

biyogaz çift yakıtlı çalışmasında ve 20 °KMA değerinde biyogaz oranından bağımsız değişimin sergilendiği, yani tutuşma gecikmesini biyogaz karışım oranının değiştirmedeği,

- NO_x emisyonunun, biyogaz karışım oranının artmasıyla düştüğü, tüm test şartlarında gözlenmiştir. Bununla birlikte, is emisyonunun biyogaz-DME çift yakıtlı çalışma koşulunda sıfıra yakın olduğu belirtilmiştir. Ancak biyogaz karışım oranının artmasıyla birlikte HC ve CO emisyonlarında da artış olduğu belirtilmiştir (Park et al., 2014).

Imiolek vd. (2011) tarafından, çift yakıtlı çalışma koşullarında yanma odasına farklı yüklerde püskürtülen pilot yakıt miktarının yanma ve performansa olan etkileri incelenmiştir. Deneyde, tek silindirli, 6,8 kW gücünde, 21/1 sıkıştırma oranına sahip direk enjeksiyonlu jeneratör olarak kullanılan dizel motoru tercih edilmiştir. Bu çalışma için, motorun orijinal dizel yakıt sistemi yerine, laboratuvar kullanımına yönelik geliştirilmiş bir common rail yakıt sistemi ve standart mekanik enjektörler yerine de benzer nozle özelliklerine sahip elektro-mekanik enjektör kullanılmıştır. Bu şekilde, enjektör açık kalma süresini (10 µs), 0,5 °KMA ile enjektör avansını, püskürtülen yakıt miktarının dört parçaya bölünerek ve her bir parçanın ayrı ayrı olarak püskürtme süresi ve püskürtme avansının ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Testler, 40 MPa enjektör püskürtme basıncında, 14,5 °KMA püskürtme avansında, 3000 min⁻¹ sabit motor devrşnde ve 0,6 kW, 1 kW, 3 kW ve 4 kW'lık değişken motor yüklerinde yapılmıştır.

Yapılan çalışma neticesinde; motorun orta yüklerinde % 5,5 pilot yakıt tüketim oranıyla, tam yüklerde ise % 2,5'lik pilot yakıt kullanımıyla bu jeneratör motorunun sağlıklı bir şekilde çalışabileceği, bununla birlikte çok düşük pilot yakıt değerlerinde tutuşma gecikmesinin ve doğalgazın varlığından dolayı yanma süresinin uzadığı, bu durumun ise gaz yakıt tüketimini önemli oranda arttırdığı ve enerji kaybının ciddi bir şekilde etkilendiği sonucuna varılmıştır (Imiolek et al., 2011).

Aktaş ve Doğan (2010) tarafından, Türkiye ve Avrupa'nın birçok ülkesinde buji ile ateşlemeli motorlarda kullanılan kütleli olarak % 30 propan ve % 70 bütandan oluşan LPG'nin kütleli olarak farklı oranlarda pilot dizel yakıtı ile birlikte tek silindirli ve direkt püskürtmeli bir motorda kullanılmasının motor performansı ve emisyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Bunun için, tek silindirli, direkt püskürtmeli, 1,9 kW gücünde ve 18/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Çift yakıt dönüşümü için LPG'nin, regülatör ile basıncı düşürüldükten sonra emme supabının arkasına bir nozul aracılığıyla püskürtmesi sağlanmıştır. Çift yakıtlı çalışmaya yönelik yapılan deneyler neticesinde;

- % 40 LPG oranına kadar olan yük değişimlerinde özgül yakıt tüketiminin dizel yakıtına göre daha düşük olduğu ancak, % 40 LPG oranının üzerine çıkıldığı durumlarda özgül yakıt tüketiminin artış gösterdiği, % 80 LPG oranına kadar tüm testlerde egzoz gaz sıcaklığı artış göstermekle birlikte, bu artışın dizel yakıtlı çalışmadakinden daha düşük olduğu,

- LPG oranının artmasıyla NO_x emisyonunda artış gösterdiği, ancak bu değerin dizel yakıtlı çalışmada ölçülen NO_x değerinden düşük olduğu, tam yükte dizel yakıtı ile % 40 seviyesinde olan is emisyonunun, çift yakıtlı çalışmada ve tam yükte % 1 seviyesine kadar düştüğü, CO ve HC emisyonlarının çift yakıtlı yapılan tüm test basamaklarında dizel yakıtlıya göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Aktaş ve Doğan, 2010).

Bari (1996) tarafından, farklı doğalgaz ve CO₂ gazı karışımlarından oluşturulmuş simultane biyogazın çift yakıtlı dizel motorda kullanımının yakıt akış oranına ve özgül yakıt tüketimine olan etkisini belirleyecek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için, 16,8 kW gücünde, iki silindirli, dört zamanlı, doğal emişli bir dizel motoru kullanılmıştır. Doğalgaz ve CO₂ gazları farklı tüplerden ve farklı yollarla emme manifoldundaki basit mikser düzeneğine aktarılmıştır. Ayrıca CO₂ gazının buzlanmasını önleyebilmek için ısıtıcı bir ünite, sisteme ilave edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucunda;

- % 40 CO₂ oranına sahip biyogazın % 96 metan oranına sahip doğalgaza kıyasla motor performansında büyük oranlarda bozulmalara sebep olmadığı, içeriğinde % 40'dan fazla CO₂ ihtiva eden biyogazın temizlenmesi gerektiği (içeriğinde yüksek oranda CO₂ bulunması durumunda düzensiz yanma ve motorda aşırı titremeye sebep olmaktadır),

- Biyogazın içeriğindeki CO₂ oranının artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin de arttığı, biyogaz akış oranının yakıt değişim oranındaki artışa bağlı olarak azaldığı yazar tarafından değerlendirilmiştir (Bari, 1996).

Ryu (2013) bu çalışmada, biyodizel/CNG çift yakıtlı dizel motorunda pilot yakıt püskürtme zamanının etkilerini araştırmıştır. Bunun için de, tek silindirli, common rail yakıt sistemli, 18/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan biyodizel, bitkisel yağlardan elde edilmiştir. Sıkıştırılmış doğalgaz emme manifoldunda subabın arkasına bir gaz enjektörü aracılığı ile püskürtülmüştür. Çalışmanın neticesinde;

- Biyodizel/CNG çift yakıtında, normal dizel yakıtına oranla daha düşük özgül yakıt tüketimi ölçüldüğü, biyodizel/CNG çift yakıtlısında daha düşük motor performansının gözlemlendiği, ancak pilot yakıt püskürtme zamanının düşük yüklerde avansa çekilmesiyle performansın iyileştirilebildiği,

- Çift yakıtlı çalışma koşulunda tutuşma gecikmesinin normal dizel çalışmasına kıyasla yaklaşık olarak 1,6-4,4 KMA daha büyük olduğu, bu tutuşma gecikmesinin artan yüke bağlı olarak azaldığı,

- Biyodizel/CNG çift yakıt koşulunda is emisyonunun oldukça düştüğü, püskürtme avansının artışıyla NO_x emisyonun arttığı, biyodizel/CNG emisyonunu dizel çalışma koşuluna göre kıyasla düşük olduğu, CO₂ emisyonunun çift yakıtlı çalışmada azaldığı, bunun ile birlikte CO ve HC emisyonlarının arttığı CO ve HC emisyonunun da arttığı rapor edilmiştir (Ryu, 2013).

Gomez vd. (2013) tarafından, biyogaz/dizel çift yakıtlı motor çalışmasında, termik verimin artırılmasını sağlamak maksadıyla H_2 ilavesinin motor performans ve emisyonlarına olan etkisini incelenmiştir. Çalışmada, iki silindirli, doğal emişli, hava soğutmalı, 15,5/1 sıkıştırma oranına sahip 20 kW gücünde dizel motoru kullanılmıştır. Biyogaz olarak CO_2 ve doğalgaz karışımı kullanılmıştır. Doğalgaz, CO_2 ve H_2 gazlarının ayrı tüplerden sisteme gönderilip basit bir mikser düzeneğinde birleştirilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak, biyogaz içerisine ilave edilen H_2 gazının yanma stabilizasyonunu, yanma odası tepe basıncını ve termik verimi artırırken, tutuşma gecikmesini ve CO ile CO_2 gaz emisyonlarını düşürdüğü tespit edilmiştir (Montoya et al., 2013).

Liu vd. (2013) tarafından, sıkıştırılmış doğalgaz/dizel çift yakıtlı motorunun emisyon karakteristiklerine olan etkisi, farklı pilot yakıt miktarı ve püskürtme avanslarına göre incelenmiştir. Bunun için, 6 silindirli, turbo emişli, 17/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Deneylerde LPG kiti ve enjektörleri kullanılarak çift yakıt dönüşümü yapılmıştır. Üç farklı motor devrinde ve her bir devir için % 50, % 75 ve % 100 motor yükünde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- Çift yakıtlı çalışma koşulundaki CO emisyonunun tek yakıtlı çalışma koşuluna göre daha yüksek olduğu ve bunun sebebinin de yanma odası içerisindeki CO_2 gazının sahip olduğu söndürücü bir etkiden kaynaklandığı,

- Fakir doğalgaz/hava karışımının düşük yanma sıcaklığı sebebiyle çift yakıtlı çalışma koşulunda NO_x emisyonunun % 30 azaldığı, bununla birlikte yanmamış HC emisyonunun, doğalgazın ihtiva ettiği metandan dolayı normal dizele kıyasla % 90 oranında arttığı,

- Artan yanmamış HC emisyonunun pilot yakıt miktarının artırılmasıyla önemli ölçüde azaltılabildiği, metan gazının moleküler yapısı nedeniyle çift yakıtlı çalışmada, partikül madde emisyonlarının ciddi oranda düşürüldüğü, ancak pilot yakıt miktarının artışıyla bu emisyonlarda da artışın olduğu belirtilmiştir (Liu et al., 2013).

Saleh (2008) tarafından, beş farklı kompozisyona sahip LPG'nin çift yakıtlı olarak dizel motorunun emisyon ve performansına etkilerini incelenmiştir. Çalışmada, iki silindirli, su soğutmalı, 16,4/1 sıkıştırma oranına sahip, 26 HP gücünde dizel motoru kullanılmıştır. Farklı kompozisyonlardaki LPG yakıtı, Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 LPG Kompozisyonları ile oluşturulan yakıt türleri (Saleh, 2008).

Test Yakıtı	Propan (C ₃ H ₈) Miktarı (%)	Bütan (C ₄ H ₁₀) Miktarı (%)
#1 Yakıtı	100	-
#2 Yakıtı	90	10
#3 Yakıtı	70	30
#4 Yakıtı	50	50
#5 Yakıtı	30	70

Dizel motorunun, bir mikser düzeneğinin emme manifoldu ve silindir arasına yerleştirilmesiyle çift yakıt dönüşümü yapılmıştır. Dönüşüm sonucunda farklı kompozisyonlara sahip LPG ana yakıt olarak motorin ise pilot yakıt olarak kullanılmıştır. Testler sonucunda;

- Motorun % 90 yakıt değişim oranıyla (% 10 pilot yakıt miktarı ile) ve % 40 propan/toplam yakıt oranında sarsıntısız çalıştığı ve konvansiyonel dizel çevrimine kıyasla daha yüksek termik verime ulaşıldığı,

- LPG kompozisyonundaki değişimin egzoz emisyonlarını, yakıt dönüşüm oranını ve egzoz gaz sıcaklığını etkilediği, yüksek bütan oranının NO_x emisyonunu azaltıcı etki yaparken, propan oranının yükselmesiyle de CO emisyonunun düşürülebildiği, #3 yakıtının (% 30 bütan bileşenine sahip) kısmi yüklerde tüm çalışma koşullarında en iyi motor performansının elde edildiği aynı kompozisyona sahip #3 yakıtında NO_x ve SO₂ emisyonlarının azaltıldığı rapor edilmiştir (Saleh, 2008).

Papagiannakis ve Hountalas (2004) tarafından, doğalgazın ana yakıt olarak, motorinin ise pilot yakıt olarak kullanıldığı bir çift yakıt düzeneğine sahip motorda performans karakteristikleri ve emisyonların değişimlerini gözlenmiştir. Bu amaçla, tek silindirli, 17,6/1 sıkıştırma oranına sahip, hava

soğutmalı, direk enjeksiyonlu dizel motorunun çift yakıt dönüşümü yapılmıştır. Netice itibari ile çift yakıtlı çalışma koşulunun daha düşük silindir tepe basıncıyla gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca kısmi yüklerde çift yakıtta yanma periyodu uzarken, tam yüklerde yapılan ölçümlerde bu periyodun konvansiyonel dizele kıyasla daha kısa olduğu değerlendirilmektedir. Çift yakıtlı motorlarda doğal gaz kullanımının NO_x emisyonuna olumlu etkisinin olduğu vurgulanırken, is ve partikül emisyonunda da gözle görülür bir düşüş olduğu kaydedilmiştir (Papagiannakis and Hountalas, 2004).

Ortam havasında bulunan O_2 miktarı değişiminin çift yakıtlı motorların çalışma ve performansına olası etkileri bu yayında incelenmiştir. Bu maksatla testler esnasında ilave O_2 gazı kullanılarak, ortam havasındaki O_2 miktarı sırasıyla, % 21, % 22, % 25 ve % 27 olarak dört farklı oranda incelenmiştir. Çalışmada, iki silindirli, hava soğutmalı, normal emişli, 15,5/1 sıkıştırma oranına sahip dizel motoru kullanılmıştır. Deneyler 1800 min^{-1} sabit motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Biyogaz olarak ise CO_2 ve doğalgaz karışımından oluşan simultane biyogaz kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; küçük miktarlardaki O_2 katkısının biyogaz-dizel çift yakıtlı motorunda yanmayı daha stabil hale getirdiği, ilave oksijenin CO_2 gazının yanma esnasındaki gaz/hava karışım sıcaklığı ve biyogazın düşük yanma hızına olan etkisinin azaltılmasına hafifte olsa yardımcı olduğu ifade edilmiştir (Cacua et al., 2012).

Mansour vd. (2001) tarafından, konvansiyonel bir dizel motorunda ana yakıt olarak doğal gazın kullanıldığı bir çift yakıtlı motorda performans ve emisyon etkilerini incelenmiştir. Çalışma hem deneysel olarak yapılmış, hem de sayısal modelleme yöntemi ile de teorik olarak gerçekleştirilmiştir. Çift yakıtla yönelik her iki çalışma metodunun ardından NO_x emisyonun teorik hesaplamalara kıyasla deneysel sonuçların daha düşük çıktığı, CO_2 emisyonunun birbirine benzer olduğu, CO emisyonunun ise motor devrine bağlı olarak dalgalanmalar yarattığı gözlenmiştir. HC emisyonunun da motor devrinin artışına bağlı olarak her iki metotta da düşüşler gösterdiği rapor edilmiştir (Mansour et al., 2001).

Wierzbicki (2011) tarafından yapılan çalışmada, çift yakıtlı bir dizel motorunda, püskürtme avansı ve püskürtülen pilot yakıt miktarı değişiminin yanma basıncına olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, tek silindirli, 6,8 kW gücünde, direk enjeksiyonlu, 0,46 litre hacimli dizel motoru çift yakıtla dönüştürülmüştür. Deneyler 3000 min⁻¹ sabit devirde, % 40 motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Avans değişkenleri, 12,5 °KMA, 14,5 °KMA, 16,5 °KMA, 19 °KMA, 21 °KMA, 23 °KMA ve 25 °KMA olarak tespit edilmiştir. Deneyler öncelikle dizel yakıtı ile yapılmış, sonrasında ise % 50 dizel yakıtı, % 22 dizel yakıtı, % 12 dizel yakıtı dönüşüm oranlarında tekrarlanmıştır. Test sonuçlarında, en fazla % 80 dizel/doğalgaz dönüşüm oranında ideal yanma tesis edildiği ve optimum yanma basıncına ulaşıldığı tespit edilmiştir (Wierzbicki, 2011).

Enerji üretimi ve ulaşım maksadıyla kırsal kesimde kullanılan küçük hacimli içten yanmalı motorlarda biyogazın kullanımı ve çevresel etkileri bu çalışmada ele alınmıştır (Ga et al., 2010). Çalışma maksadıyla biyogaz 30 litre hacimli ve 6 bar basınçlı tüpte depolanmıştır. Farklı arındırma miktarları ile üç farklı metan oranına sahip yakıt elde edilmiştir. Elde edilen yakıtlara ilişkin bilgiler, Çizelge 3.10'da sunulmuştur. Deneysel çalışmanın sonucunda;

Çizelge 3.10 Saflaştırma işlemi sonrasında elde edilen biyogazın içeriği (Ga et al., 2010).

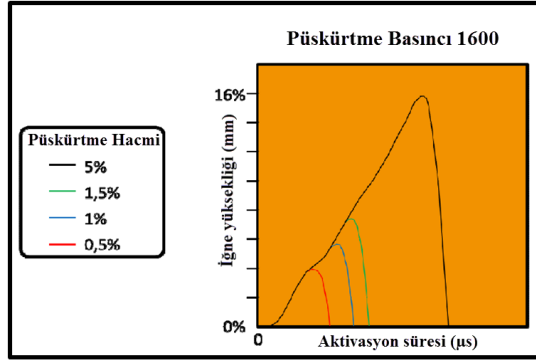
Bileşenler	Ham Biyogaz	CaO Topraklı Saflaştırma	CaO-NaOH Tozuyla Saflaştırma
CH ₄	61,2	72,1	83
CO ₂	37	20,3	12,5
Yanma Süresi	10'23"	18'46"	31'42"

- Sabit devirli jeneratör motorunda çift yakıt teknolojisi ile biyogaz kullanıldığında konvansiyonel dizel yakıtından elde edilen güç çıkışının % 90'nın elde edilebildiği, biyogazlı jeneratör motorunda daha düşük eşdeğerlik oranı (daha yüksek hava fazlalık katsayısı) sayesinde otomotiv motorları için kullanılan düzenlemelerdeki CO ve HC emisyonlarını çok daha aşağılara çekebileceği,

- 1 kWh'lik elektrik üretimi için yaklaşık 1 m³ biyogaz tüketimi yapılırken, 1 kg CO₂ emisyonunun azaltıldığı, motosiklet motorunda yapılan çalışmalarda ise 120 bar basınçta 20 litrelik tüp içerisinde biyogaz ile 100 km yol alınabileceği belirtilmiştir (Ga et al., 2010).

Felt ve Steele (1962) tarafından, çift yakıtlı motorlardaki yanma kayıpları ile, buji ile ateşlemeli motorlardaki vuruntu kayıplarını belirlenmiştir. Birincil yakıt olarak gazları kullanmış, bunların vuruntuya dayanıklılıkları ve vuruntu kontrolündeki etkileri incelenmiştir. Çift yakıtlı motorlarla, dizel motorlarının yanma diyagramları çıkarılmış, basınç-zaman diyagramlarında vuruntu ve vuruntusuz çalışma noktaları ile enjeksiyon açıları değiştirilerek, güç değişimleri incelenmiştir. Çeşitli oranlarda uygulanan propan, metan ve doğalgazın, pilot yakıt ile çalışmasında oktan numarasındaki değişiklikler bu yazarlar tarafından araştırılmıştır. Metan gazının 100 oktan numarasından 121 oktan numarasına kadar farklı oranlarda pilot yakıt ile kullanımında; termik verim % 34,8'den % 37,8'e kadar değişmiş, doğal gaz ile yapılanlarda ise bu değer, dizel motorlarının termik verimi ile karşılaştırıldığında belirli bir yükten sonra daha yüksek olduğu görülmüştür (Felt and Steele, 1962).

L'Orange (2016) firması tarafından daha küçük boyutlarda, yüksek ısı ve basınca dayanıklı yeni bir çift yakıt enjektörü geliştirilmiştir. Bu sistemde her silindir için bir adet enjektör, bir adet yüksek basınç pompasından oluşmaktadır. Bu yeni basitleştirilmiş enjektör tek iğneli bir memeye sahiptir. Bu enjektörler daha çok sabit devirli ve büyük kapasiteli motorlar için tasarlandığı belirtilmiştir. Bu sistemde pilot yakıt miktarının % 1'in altına kadar düşürülebildiği ifade edilmiştir. Şekil 3.3'de pilot yakıt miktarının değişimi ile enjektör iğne hareketi gösterilmektedir. Pilot yakıt miktarındaki değişim sayesinde çok düşük NO_x seviyelerine ulaşılabileceği ifade edilmektedir (Senghaas, 2016).



Şekil 3.3 Pilot yakıt miktarı ve iğne hareket miktarları (Senghaas, 2016).

Kiesling (2016) tarafından, gelişmiş bir L'Orange geniş aralıklı tek memeli çift yakıt dizel enjektörün enjeksiyon davranışının incelenmiştir. Bu amaçla değişken basınç ve sıcaklık şartlarının oluşturulabileceği bir adet püskürtme odası geliştirilmiştir (Şekil 3.4). Bu sayede enjektörlerin püskürtme ölçüm hızları ve optik incelemeleri yapılmıştır. İncelemeler, spray buhar fazı ve spray sıvı fazı, yüksek hızlı Schlieren ve yüksek hızlı Mie saçılım teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. İncelemelerin odağı, yüksek devirli çift yakıtlı motorlara uygulanan küçük pilot yakıt miktarı (tam yük dizel yakıtın % 1-10'u) üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Püskürtme odası ve temel çalışma düzeni (Kiesling, 2016).

Çalışma sonucunda, geniş kullanım aralığına sahip enjektörler % 10 pilot yakıt miktarına kadar oldukça verimli çalışırken, % 3 pilot yakıt miktarına inildiğinde bazı olumsuzlukların gözlemlendiği bildirilmiştir. Buna

rağmen pilot enjektör ile bu geniş kullanımlı enjektör verileri arasındaki farkın çok büyük olmadığı bildirilmiştir (Kesling, 2016).

Aliserai vd. (2012) tarafından, dizel yakıtı ve biyodizel karışımlarının titreşim değerlendirmesi yapılmıştır. Bu maksatla altı silindirli, dört zamanlı, dizel motoru tercih edilmiştir. İvmeölçer aracılığı ile yapılan titreşim ölçümlerinde 1800 ve 2000 min⁻¹ motor hızlarında titreşim ivmelenmesinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte titreşim seviyelerinin yakıt karışımlarına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Verilen sonuçlar kapsamında, B40 ve B20 yakıt karışımlarında titreşimin minimum seviyede olduğu ifade edilmiştir. B15, B30 ve B50 yakıtlarında en yüksek titreşim verileri elde edilmiştir (Alisaraei et al., 2012).

Uludamar vd. (2016) tarafından, ayçiçek, kanola ve mısır biyodizel karışımlarının dizel motorunda meydana getirdiği titreşim ve gürültü emisyonları incelenmiştir. Bu maksatla dört zamanlı dört silindirli dizel motoru tercih edilmiştir. Aynı şekilde motorun emme sistemine hacimsel olarak 3 l/dk ve 6 l/dk debilerinde hidrojen ilavesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, hidrojen ilavesi ile ses hacminin değişmesinin motor hızına bağlı olduğu, titreşim ivmesinin tüm motor hızlarında gaz ilave edilmesi ile azaldığı bildirilmiştir (Uludamar vd, 2016).

Karanjkar ve Supekar (2015) tarafından, tek silindirli bir dizel motorunda farklı soğutma suyu sıcaklıklarında motor titreşimindeki değişimleri araştırılmıştır. Titreşim değerlendirmeleri Fast Fourier Transsform (FFT) yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Çalışma sonucunda soğutma suyu sıcaklığının artmasıyla hız ve yer değiştirme ortalama değerlerinin arttığı bildirilmiştir. Ayrıca farklı soğutma suyu sıcaklıklarında elde edilen yer değiştirme, hız ve ivmenin ilgili spektrumlarından, üst tepe değerlerinin çoğunun 10 Hz ile 150 Hz arasında olduğu ve bu aralıklarda motorun maksimum titreşimlerinin olduğu bildirilmiştir (Karanjkar and Supekar, 2015).

Solmaz tarafından, tarafından yapılan çalışmada, dört silindirli dört zamanlı bir dizel motorunun dinamik modeli geliştirilmiş ve motor titreşimleri incelenmiştir. Geliştirilen model motor bloğunun üç eksenindeki öteleme hareketlerini, bu eksenler etrafındaki dönme hareketlerini ve krank milinde meydana gelen hız dalgalanmalarını ihtiva eden yedi serbestlik derecesine sahip bir modeldir. Modelde silindir gaz basınç kuvvetleri, hareketli parçaların atalet kuvvetleri, hidrodinamik ve kuru sürtünme kuvvetleri, harici yük momenti ve marş momenti dikkate alınmıştır. Motor bloğunun sabit bir zemine önden iki ve arkadan bir takoz ile bağlandığı kabul edilmiştir.

Analizin daha gerçekçi olması için tek silindirli dizel motorundan deneysel olarak elde edilen silindir içi basınç verileri kullanılmıştır. Modelin sayısal çözümü için Taylor seri metodu kullanılmış ve FORTRAN dilinde bir program hazırlanmıştır. Geliştirilen simülasyon programı kullanılarak farklı motor yüklerinin, silindir basıncında meydana gelen çevrimsel farklılıkların, biyellerin atalet kuvvetlerinin, birleştirilmiş krank ve volan atalet momentlerinin, pistonların atalet kuvvetlerinin, karşı ağırlıkların atalet kuvvetlerinin etkileri incelenmiştir.

Uygun takoz parametrelerinin belirlenebilmesi için öncelikle her eksenindeki optimum eşdeğer takoz parametreleri belirlenmiş daha sonra tork dönme eksenini dikkate alınarak üç takoz için ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen modelin içten yanmalı motorların titreşim kaynaklarının belirlenmesinde, bu titreşimleri azaltma çalışmalarında ve uygun takoz parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir. Oluşturulan model ile motor bloğu hareketleri ve krank mili hız dalgalanmaları belirlenmiş, doğrusal ve döngüsel hareket gerçekleştiren parçaların ataletlerinin, sürtünmelerinin ve farklı gaz basınç profillerinin motor bloğu hareketlerine ve krank mili hız dalgalanmalarına olan etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda motor bloğu hareketlerine bağlı olarak meydana gelen takoz kuvvetlerinin optimum şekilde izole edilebilmesi için uygun takoz parametreleri belirlenmiştir (Solmaz, 2014).

Öztürk (2011) tarafından, tek silindirli dört zamanlı dizel motorunun dinamik modellemesi yapılarak; motorun hızlanma sürecinde sergilediği davranışlar, motor bloğunun titreşimleri, krank milinin açısal hızının değişimleri, takozlarda oluşan dinamik kuvvetler, sürtünme kuvvetlerinin açısal hız değişimlerine etkileri ile hareketli parçaların kütle atalet kuvvetlerinin krank milinin açısal hız değişimlerine ve motor blok titreşimlerine etkileri incelenmiştir. Dinamik model; piston, biyel, krank mili ve motor bloğu hareket denklemlerinden oluşmaktadır. Model; atalet kuvvetleri ile momentlerini, hidrodinamik ve kuru sürtünme kuvvetleri ile momentlerini, marş momentini, harici yük momentini, gaz basıncı ve takoz kuvvetlerini içermektedir. Bloğun ve diğer dinamik elemanların hareketleri krank eksenine dik bir düzlemde tanımlanmıştır. Sunulan çalışmada sayısal çözümleme işlemleri, başlangıç koşulları altında zaman değişkenine göre yapılmıştır. Simülasyonda kullanılan gaz basıncı, tek silindirli dört zamanlı dizel motorundan deneysel yöntemle elde edilmiştir (Öztürk, 2011).

4. MATERYAL VE METOD

Biyogazın, çift yakıtı dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda, ana yakıt olarak kullanımına yönelik yapılan çalışma Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü ve Teksan Jeneratör Fabrikasında gerçekleştirilmiştir.

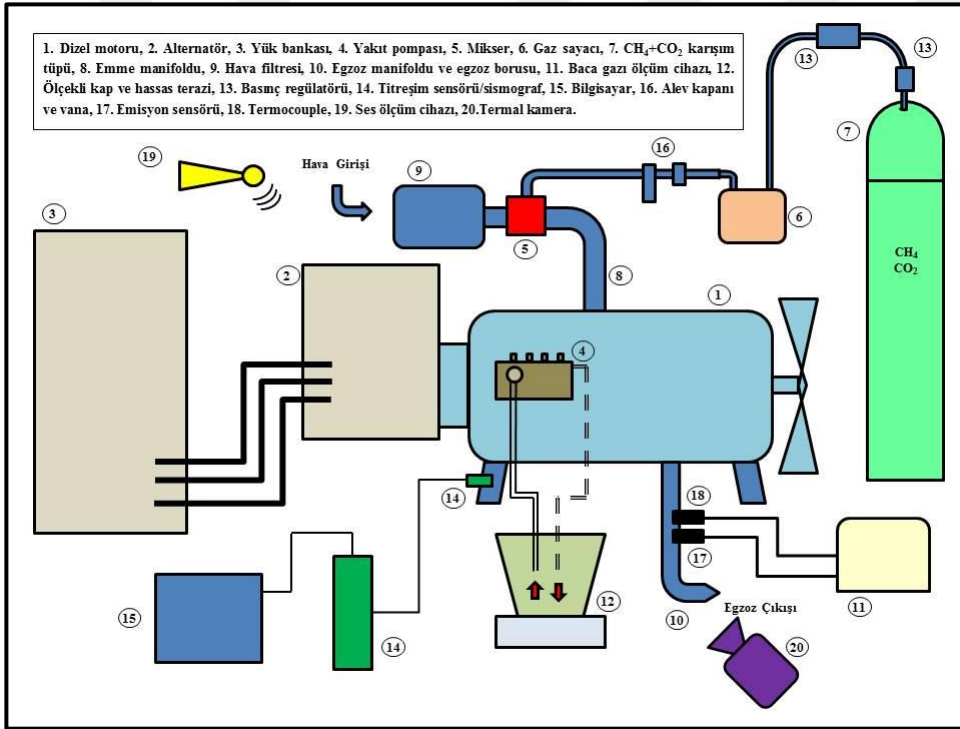
Bu çalışmada, öncelikle Teksan Jeneratör Fabrikasında (İstanbul), 25 kW gücünde bir jeneratör motoru, çift yakıt ile çalışması maksadıyla bir mikser düzeneği kullanılarak modifiye edilmiştir. Bu modifikasyon esnasında mevcut yakıt sistemi muhafaza edilmiştir. Saf CH_4 ve CO_2 gazı karışımlarından elde edilen biyogazın ve doğal gazın tek yakıtlı çalışma koşuluna göre çift yakıtlı mukayesesi yapılmıştır. Bu mukayeseler; emisyon, performans, titreşim yayılımı, gürültü emisyonu, ısı yayılımı, yakıt tüketimi ve yakıt ekonomisi, enerji maliyetleri üzerinde durulmuştur. H_2S 'in yanma esnasında reaksiyona girerek H_2SO_4 'e dönüşmesi neticesinde motor yağı ve motor yataklarında muhtemel meydana gelebilecek bozulma ve yıpranmalara yönelik olarak da çeşitli tiplerde motor yağı numuneleri ve yatak malzemeleri ayrıca deneysel olarak incelemeye tabi tutulmuştur. Motorun emisyon ve performansına yönelik deneyler. Farklı marka ve özellikteki motor yağları ile yapılan deneyler sonrasındaki numuneler ise OPET FUCHS (İzmir) akredite laboratuvarında dört bileye deneyine tabi tutulmuştur. TEKSAN Jeneratör fabrikasında kurulan deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 4.1'de, deney ortamı Şekil 4.2'de, şematik görünümü ise Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Deney düzeneğinin genel görünümü.



Şekil 4.2 Deney ortamı.



Şekil 4.3 Deney düzeneğinin şematik görünümü.

4.1 Materyal

4.1.1 Deney motoru

Deneylerde A4CRX25 model, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı, doğal emişli ve dört zamanlı dizel motoru kullanılmıştır. Şekil 4.4’da deneyde kullanılan

motorun genel görünümü ve Çizelge 4.1’de de motorun genel özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Deney Motoru.

Çizelge 4.1 Deney motoru teknik özellikleri.

Model	A4CRX25
Püskürtme sistemi	Direkt püskürtmeli
Silindir sayısı	4 Sıra tipi
Silindir çapı	90 mm
Strok	100 mm
Hacim	2543 cc
Sıkıştırma oranı	18:1
Maksimum güç	25 kW
Motor devri	1500 d/d
Besleme tipi	Normal emişli
Püskürtme zamanı	15° ±1 ÜÖN önce
Enjektör püskürtme basıncı	20 MPa
Soğutma suyu sıcaklığı	75-90 °C
Subab düzenlemesi	Üstten kamlı

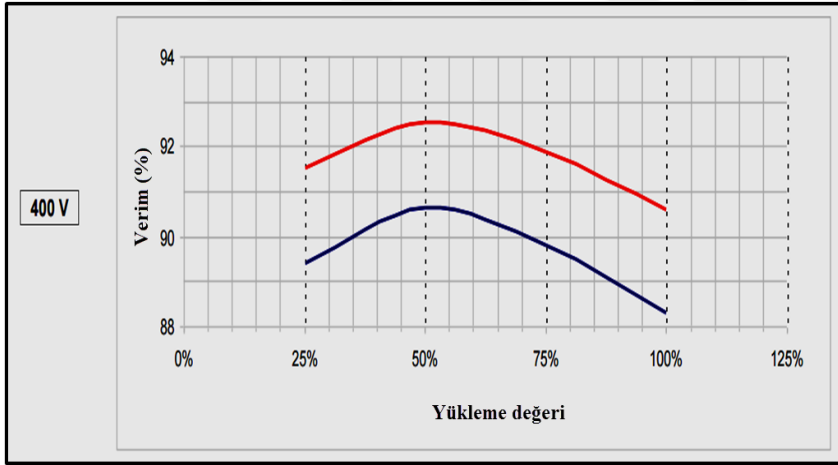
4.1.2 Alternatör

Jeneratör düzeneğinde Marelli marka alternatör ($\cos \phi=1$) kullanılmıştır. Kullanılan alternatörün görünümü ve yüke bağlı verim değişiminin yer aldığı verim grafiği Şekil 4.5 ile Şekil 4.6’da, teknik verileri ise Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Motor yüküne bağlı olarak alternatörün verimindeki değişimler

dikkate alınarak motor çıkış güçleri belirlenmiştir. Alternatör üzerine yerleştirilen panel sayesinde motorda bulunan sensörlerden anlık veri izlenebilmektedir. Bu sayede motor soğutma suyu sıcaklığı, motor yağ basıncı ve motor devri ile üretilen güç sürekli kontrol edilmiş ve veriler kaydedilmiştir.



Şekil 4.5 Alternatör genel görünümü.



Şekil 4.6 Alternatör verim grafiği.

Şekil 4.6'da üst kısımdaki kırmızı eğri cosinüs ϕ değeri 1'e göre oluşacak verim grafiğini, alt taraftaki mavi eğri ise cosinüs ϕ 0,8'e göre oluşacak verim değerlerini ifade etmektedir. Deneyler, rezistif yük bankası kullanılarak yapıldığından alternatör veriminin hesaplanmasında cosinüs ϕ 1 eğrisi esas alınmıştır.

Çizelge 4.2 Alternatör teknik verileri.

D-uç yatak/Yağlama	6310 2RS C3/Ön yağlama
N-uç yatak/Yağlama	6309 2RS C3/Ön yağlama
Maksimum devir (rpm)	2250
Ağırlık (kg)	188
Soğutma metodu	ICO1
Soğutma havası (m ³ /s) @50/60 Hz	0,11/0,14
Dönüş yönü	Saat Yönü
Direnç (Ω)	0,3
Aşırı Yük	% 10 her 12 saatte 1 saat
3 Faz kısa devre sürekli akımı	≥ 300 % (3 in) yardımcı sargı
Gerilim hassasiyeti	± 1 %

4.1.3 Yük bankası

Jeneratör motoruna montajı yapılan alternatörü yükleyerek motorun test edilmesinin sağlanabilmesi için TEKSAN marka, rezistif tip, 200 kW kapasiteli, 1 kW yük adımına sahip, hava soğutmalı yük bankası kullanılmıştır. Yük bankası Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Yük bankası kontrol paneli

4.1.4 Baca gazı emisyon cihazı

Deneyler esnasında emisyon değerleri, elektrokimyasal sensörlere sahip Optima 7 baca gazı ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. 3,5” TFT LED ekrana sahip, yazılım ve fonksiyon tuşları ile menü içerisinde gezinti imkânı tanıyan, PTFE filtreli yoğuşma haznesi bulunmaktadır. Bu cihaz ile uygun problemler

kullanılarak, Çizelge 4.3'te yer alan ölçümler yapılabilir. Baca gazı ölçüm cihazının genel görünümü, Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Ölçümü yapılabilen gazlar ve ölçüm değerleri.

O ₂	0 – 21,00 (%)
CO ₂	0 – 20,00 (%)
CO	0 – 500 ppm
NO	0 – 5000 ppm
NO ₂	0 – 1000 ppm
NO _x	0 – 5000 ppm
SO ₂	0 – 5000 ppm
Yanma hava sıcaklığı	100 °C'ye kadar
Baca gazı sıcaklığı	<1100 °C
HFK (λ)	-



Şekil 4.8 Baca gazı ölçüm cihazı.

4.1.5 Gürültü emisyonu ölçüm cihazı

Farklı yakıt türleri ve yakıt sistemlerine bağlı olarak ortama yayılan gürültü emisyonunun ölçülmesi amacıyla TES 1357 marka bir ses ölçer kullanılmıştır. Bu cihazın genel görünümü Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Çalışma öncesinde söz konusu cihazın kalibrasyonu yapılarak deneylere başlanmıştır. Fabrika bünyesinde

testler bitinceye kadar başka bir ölçüm amacıyla kullanılması engellenmiştir. TES 1357'ye ait bazı teknik veriler Çizelge 4.4'de sunulmuştur.



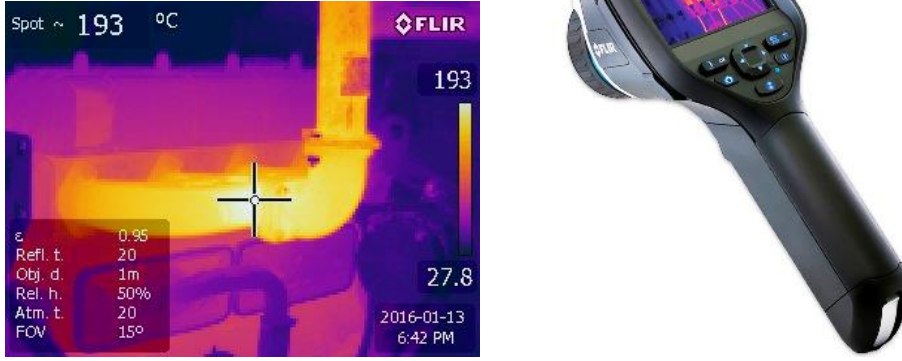
Şekil 4.9 Ses ölçüm cihazı.

Çizelge 4.4 Ses ölçüm cihazı teknik verileri.

Uygulanan standart	IEC651
Doğruluk	$\pm 1,5$ dB
Frekans aralığı	31,5 Hz – 8 KHz
Ölçüm seviyesi	30 – 130 dB
Frekans ağırlığı	A, C
Mikrofon	½ inç Elektret kondenser
Çözünürlük	0,1 dB
Örnekleme oranı	50 mS
Kademe seviyeleri	30-80 dB, 50-100 dB, 60-110 dB, 80-130 dB
Çalışma ortamı ısısı	0 – 40 °C
Çalışma ortamı nemi	% 10 – 80 bağıl nem

4.1.6 Termal kamera

Jeneratör motorunun çeşitli parçalarından çevreye yayılan ısıyı ölçebilmek ve yalıtım çalışmalarında elde edilecek farkları görebilmek maksadıyla FLIR marka termal kamera kullanılmıştır. Deney motorunda farklı yakıt tiplerine bağlı olarak egzoz manifoldu, emme manifoldu, silindir kapağı ve silindir bloğundan çevreye yayılan ısı miktarı tespit edilmiştir. FLIR-E40 marka termal kameranın görüntüsü Şekil 4.10'da, teknik özellikleri ise Çizelge 4.5'te sunulmuştur.



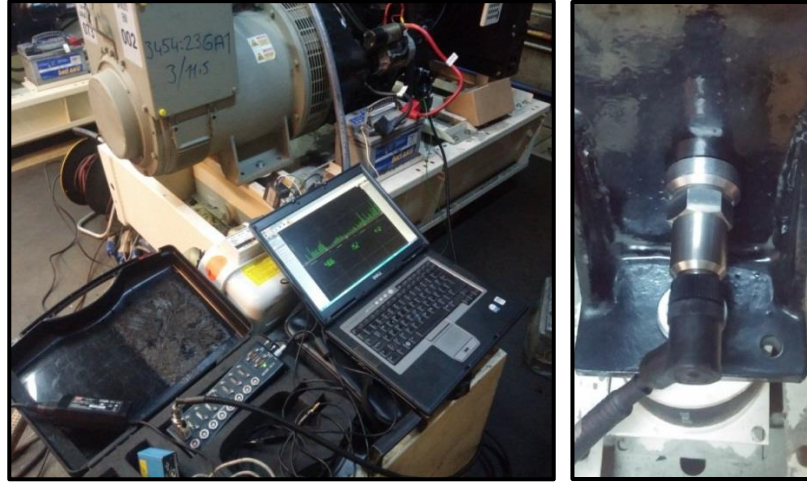
Şekil 4.10 Termal kamera ve örnek görüntü.

Çizelge 4.5 Termal kameranın teknik özellikleri.

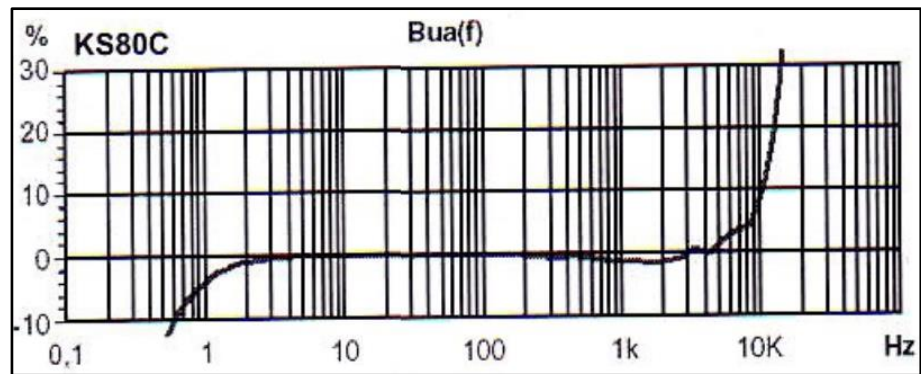
Marka/model	FLIR E40
Termal çözünürlük	160x120 piksel
Uzaysal çözünürlük	2,72 mrad
Termal hassasiyet	< 0,07 °C
Sıcaklık aralığı	-20 °C ile + 120 °C, 0 °C ile +650 °C
Spotmetre	3
FOV/Min.Fokus mesafesi	25° x 19° / 0,4 m
Spektral alan	7,5-13 µm
Çalışma sıcaklığı	-15 °C ile +50 °C
Nem	IEC 60068-2-30/24 saat %95 bağıl nem

4.1.7 Sismograf (Titreşim ölçüm cihazı)

Dizel tek yakıtlı, doğalgaz ve biyogaz çift yakıtlı çalışma şartlarında motorda meydana gelen titreşimlerin ölçülmesi maksadıyla sismograf kullanılmıştır. Bu sismograf sayesinde yakıt değişim oranına bağlı olarak ortaya çıkabilecek vuruntu kaynaklı titreşimler tespit edilmiştir. Aynı zamanda uygun yakıt değişim oranı tesis edildikten sonra ölçülen titreşim değerleri dizel tek yakıtlı ile kıyaslanmıştır. Bu düzenek, DEWE 43A data logger, DEWE soft yazılım ile akselerometre sensörden teşkil edilmiştir. Sismograf düzeneği, Şekil 4.11 (a,b,c)'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 (a, b, c) Sismograf düzeneğinin genel görünümü ve sinyal grafiği.



Şekil 4.12 MMF KS80C model titreşim sensörü genleşme eğrisi.

Çizelge 4.6 Piezoelektrik titreşim sensörü teknik özellikleri.

Voltaj hassasiyeti (mV/g)	100 ± 5 %
Doğrusal frekans aralığı (Hz)	0,3 .. 14000, 0,7 .. 10000, 0,9 .. 7500
Rezonans frekansı (kHz)	> 23 (+25 dB)
Transverse duyarlılığı (%)	< 5
Artık ses (µg)	< 200
Yoğunluk (µg/Hz) – 0,1 Hz, 100 Hz	30, 1
Sabit akım kaynağı (mA)	2 .. 20
Çalışma sıcaklığı aralığı (°C)	-20 / 90
Hassasiyetin sıcaklık katsayısı (%/K)	± 0,02 (-20 .. 0 °C), > -0,03 (0 .. 40 °C) > -0,05 (40 .. 90 °C)
Geçici hassasiyeti (ms ⁻² /K)	0,02

Çalışmalarda, Dewe 43A ile uyumlu MMF KS80C model piezoelektrik titreşim sensörü kullanılmıştır. Titreşim sensörüne ilişkin teknik bilgiler, Çizelge 4.6’da, kullanım ile ilgili genişleme grafiği, Şekil 4.12’de verilmiştir.

4.1.8 Gaz sayacı

Çift yakıt dönüşümün yapılmasının ardından hem doğalgazlı hem de biyogazlı deneylerde körüklü tip gaz sayaçları kullanılmıştır. Her iki gazın farklı yoğunluk ve kalorifik değerlerde olması nedeniyle farklı debi ve kapasitelere sahip iki adet körüklü tip sayaç kullanılmasının daha uygun olacağı değerlendirilmektedir. Bu anlamda Metrix G6 ve ECA G4 marka sayaçlar tercih edilmiştir. Söz konusu sayaçların temel teknik verileri, Çizelge 4.7’de genel görünümeleri ise, Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 Körüklü tip sayaçların özellikleri.

Temel Özellikler	G6	G4
Maksimum akış miktarı (m ³ /h)	10	6
Minimum akış miktarı (m ³ /h)	0,06	0,040
Nominal akış oranı (m ³ /h)	6	-
Çevrimsel hacim dm ³	2,2	1,2
Maksimum çalışma basıncı (bar)	0,5	0,5



Şekil 4.13 G6 ve G4 model körüklü gaz sayaçlarının genel görünüşleri.

4.1.9 Hassas terazi

Gerek tek yakıtla yapılan testlerde gerekse çift yakıtlı yapılan testlerde sıvı yakıt tüketiminin ölçümü maksadıyla Precisa XT 1220M model, 0,001 gr ölçüm hassasiyetine sahip bir hassas terazi kullanılmıştır. Yakıt ölçüm düzeneği, Şekil 4.14’de sunulmuştur.



Şekil 4.14 Sıvı yakıt ölçüm düzeneği.

4.1.10 Mikser düzeneği

Tek yakıtlı dizel motorunu çift yakıtlı olarak çalışabilmesi için Impco CA55M-5-9 model bir mikser düzeneği yurt dışından temin edilmiştir. Bu mikser motorun emme sistemine monte edilmiştir. Mikser düzeneğinin kapasitesi motorun 1500 d/d hızında tükettiği hava miktarının geçişine müsaade edebilecek seviyede olmasına özen gösterilerek seçilmiş ve tek yakıtlı çalışma özellikleri mikserden önce ve sonrasında karşılaştırma yapılarak muhtemel kayıpların olup olmadığı veya kapasite çakışması kontrol edilmiştir. Bu uygunluk testinden sonra emme manifoldu ile hava filtresi arasına yerleştirilen mikserin gaz yakıt bağlantı ucuna öncelikle doğalgaz ve sonrasında ise biyogaz bağlanmış ve debi ayarlamalarının yapılmasının ardından testler gerçekleştirilmiştir. Mikserin genel görünümü ve deney motoruna montajı, Şekil 4.15’de gösterilmektedir. Mikserin genel özellikleri Çizelge 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.15 Impco CA 55-5M-9 model mikser ve montajı.

Çizelge 4.8 Mikser genel özellikleri.

Özellikler	Değerleri
Kullanılan yakıt tipi	LPG veya Doğalgaz
Çalışma sıcaklığı	-40 °C ile 121 °C
Montaj pozisyonu	Dikey
HP/kW oranı ve debi	73 hp (54 kW)'a kadar ve 118 CFM (55,7 l/s)
Alt ısı değeri (kJ/kg)	42700

4.1.11 Pilot dizel yakıtı

Bu çalışmada, özellikleri Çizelge 4.9'da verilen konvansiyonel dizel yakıtı kullanılmıştır. Pilot yakıt olarak kullanılan bu yakıtın bazı özellikleri, Intertek Caleb Brett (ITS. Caleb Brett/Deniz Survey S.A.) akredite laboratuvarında yapılan analiz ile belirlenmiştir.

Çizelge 4.9 Konvansiyonel dizel yakıtının kimyasal özellikleri (Intertek, 2016).

Özellikler	Değerleri
Yoğunluk (kg/l)	0,8326
Kükürt (%)	< 0,01
Su miktarı (ppm)	110
Setan indisi	56,7
Alt ısı değeri (kJ/kg)	42700

4.1.12 Doğalgaz özellikleri

Çift yakıtı yönelik yapılan çalışmalarda alternatif sonuçların değerlendirilmesinde ve biyogazın farklı bir gaz yakıt ile mukayesesinin yapılmasına imkân tanınması maksadıyla doğalgazın kullanımı deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneylerde kullanılan doğalgazın özellikleri Çizelge 4.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10 Doğalgazın özellikleri (İgdaş, 2016).

Özellikler	Değerleri
Metan	Min. % 82
Etan	Maks. % 12
Propan	Maks. % 4
Bütan	Maks. % 2,5
Pentan vd. ağır karbonlar	Maks. % 1
Karbondioksit	Maks. % 3
Oksijen	Maks. % 0,5
Azot	Maks. % 5,5
Alt ısı değeri (kcal/m ³)	8100
Çiğlenme noktası	Maks. -8 °C
Yoğunluk (kg/m ³)	0,717

4.1.13 Özel karışım biyogaz

Çift yakıt sisteminde ana yakıt olarak kullanılacak olan biyogaz için özel karışım gazı Linde Group Gaz A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Hazırlanan özel karışımın içeriğinde % 60 oranında CH₄ ve % 40 oranında CO₂ bulunmaktadır. Doğalgazın içerisinde yer alan farklı katkı maddelerinin yanmaya ve test sonuçlarına etkilerini ortadan kaldırabilmek maksadıyla özel karışım gazı kullanılmıştır. Biyogazın özellikleri Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Söz konusu karışım gazı, iki kademeli basınç düşürme düzeneği kullanılarak 200 bar’dan 300 mbar basınca düşürülerek gaz sayacına gönderilmiştir. Biyogazın debisi körüklü tip sayaç aracılığı ile ölçülmüştür. Deneyin yapıldığı şehir, istasyon basıncı, toprak altı sıcaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak K düzeltme katsayısı 1,2 olarak hesaplanarak tüketim değerleri revize edilmiştir.

Çizelge 4.11 Biyogazın özellikleri.

Özellikler	Değerleri
Bileşenler	% 60 CH ₄ , % 40 CO ₂
Gazların saflık değerleri	CH ₄ : % 99,5 – CO ₂ : % 99,998
Yoğunluk (kg/m ³)	1,2208
Alt ısı değeri (kJ/kg)	17659
Stokiyometrik H/Y oranı	6,04/1
Metan sayısı	140

4.1.14 Kullanılan yağ numuneleri

H₂S'in yağlarda meydana getirdiği bozulmaları görebilmek ve mevcut gaz motorları yağları arasında bir kıyas yapabilmek maksadıyla dört farklı markaya ait yağ numunesi kullanılmıştır. İsimleri gizli tutulan farklı yağ numunelerine ilişkin özellikler Çizelge 4.12-15'de verilmiştir.

Çizelge 4.12 1 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.

Yağ Özelliği	Değerler
SAE Sınıfı	15 W – 40
Viskozite, ASTM D 445	-
cSt @ 40 °C	114
cSt @ 100 °C	15,0
Viskozite indeksi, ASTM D 2270	137
Sülfatlanmış kül, kütle kesri, ASTM D 874	0,98
Toplam baz sayısı, mgKOH/g, ASTM D 2896	10,4
Akma noktası, °C, ASTM D 97	-30
Parlama noktası °C, ASTM D 92	236
Yoğunluk @ 15 °C kg/l, ASTM D 4052	0,876

Çizelge 4.13 2 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.

Yağ Özelliği	Değerler
SAE Viskozite Derecesi	40
Kinematik viskozite @ 40 °C mm ² /s, ASTM D445	125
Kinematik viskozite @ 100 °C mm ² /s, ASTM D445	13,5
Yoğunluk @ 15 °C, kg/l, ASTM D4052	0,890
Parlama noktası (Cleveland açık kap metodu), °C, ASTM D92	268
Akma noktası, °C, ISO 3016	-18
Toplam bazı sayısı, mgKOH/g, ASTM D 2896	5,3
Sülfatlanmış kül, % wt, ISO 3987	0,57
Fosfor, ppm, ASTM D4047	300

Çizelge 4.14 3 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.

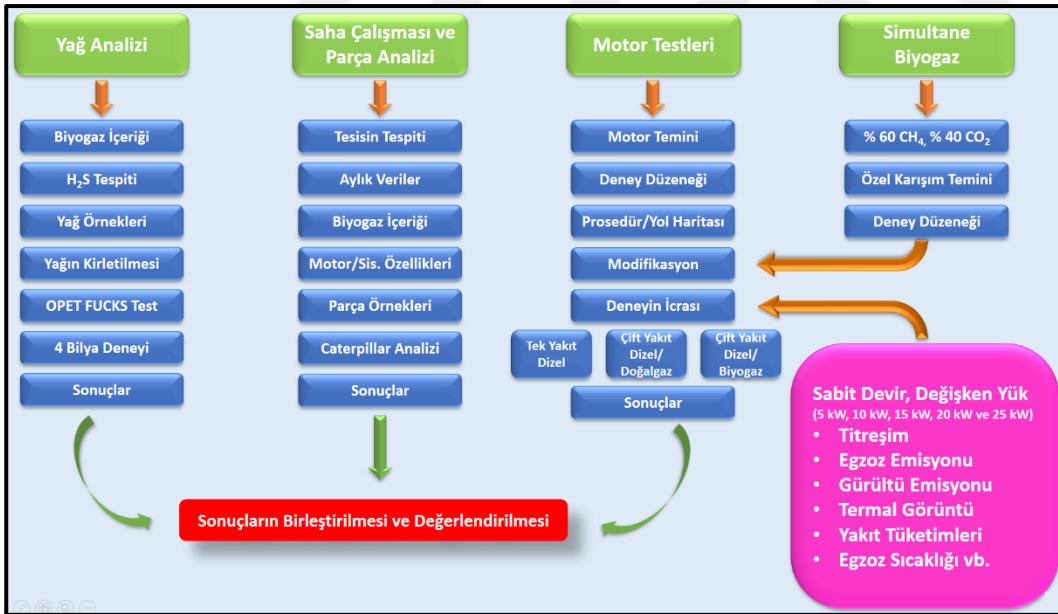
Yağ Özelliği	Değerler
SAE Viskozite Derecesi	40
Kinematik viskozite @ 40 °C mm ² /s, ASTM D445	145
Kinematik viskozite @ 100 °C mm ² /s, ASTM D445	14,5
Viskozite indeksi, ASTM D2270	98
Yoğunluk @ 35 °C, kg/l, ASTM D4052	0,896
Parlama noktası (Cleveland açık kap metodu), °C, ASTM D92	272
Akma noktası, °C, ASTM D97	-21
Toplam bazı sayısı, mgKOH/g, ASTM D 2896	5
Sülfatlanmış kül, % wt, ISO 3987	< 0,5
Fosfor, ppm, ASTM D4047	~ 300

Çizelge 4.15 4 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.

Yağ Özelliği	Değerler
SAE Viskozite Derecesi	-
Kinematik viskozite @ 40 °C mm ² /s, ASTM D445	13,3
Kinematik viskozite @ 100 °C mm ² /s, ASTM D445	-
Viskozite indeksi, ASTM D445	70
Yoğunluk @ 20 °C, kg/l, ASTM D1298	0,825-0,850
Parlama noktası, °C	182
Akma noktası, °C	-18

4.2 Metot

Bu tez çalışması kapsamında, çift yakıt dönüşüm, motor performans ve emisyonlarının tespitine yönelik kullanılan yöntem ve hesaplamalar sırasıyla açıklanmıştır. Dört farklı başlık altında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ortak olarak değerlendirmeye alınmıştır. Bu içeriğe ait açıklayıcı şema Şekil 4.16'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Doktora tez çalışmasının kapsamı ve içeriği.

4.2.1 Doğalgaz sayaç düzeltme katsayısı (K)

Gazlar sıkıştırılabilir akışkanlar olduklarından, farklı basınçlar altında farklı hacimler ile karşılaşılabilir. Meteorolojiden alınan atmosfer basıncı

verilerine ve kullanım alanlarına göre doğalgaz için düzeltme katsayıları hesaplanmaktadır. Deneylerde kullanılan doğalgaz için sayaç değerlerine aşağıdaki yöntemle belirlenen düzeltme katsayısı uygulanmıştır.

$$m_d = m_s \times K \quad (4.1)$$

$$K = (P/P_r) \times (T_r/T) \times (Z_r/Z) \quad (4.2)$$

$$P = P_a + P_s \quad (4.3)$$

m_d : Düzeltilmiş hacim (m^3)

m_s : Sayaçtan ölçülen hacim (m^3)

K : Düzeltme katsayısı

P : Ölçüm basıncı (bar)

P_a : Aylık olarak şehir giriş veya diğer ölçüm istasyonuna girilmiş basınç değeri (bar)

P_r : Referans şartlardaki basınç (1,01325 bar)

P_s : Sayaç ölçüm basıncı (bar)

T : P_a değerinin alındığı meteoroloji istasyon müdürlüğünden ilgili şehir için alınmış son 10 yılın 75 cm için hesaplanan toprak altı sıcaklık değerinin ortalaması (K)

T_r : Referans şartlardaki sıcaklık (288,15 K)

Z : Ölçüm şartlarındaki sıkıştırılabilirlik

Z_r : Referans şartlardaki sıkıştırılabilirlik

Z_r/Z (Sıkıştırılabilirlik oranı) : 1 olarak alınmaktadır.

Yukarıdaki veriler ilgili kurum/firmalardan temin edilerek, hesaplamalar yapılmıştır. Söz konusu hesaplamalar neticesinde basınç düzeltme katsayısı 1,2 olarak bulunmuştur. Bu katsayı kullanılan sayaçlardan okunan değerler ile çarpılarak gerçek gaz tüketim değerleri tespit edilmiştir. Tüm bulgulardan ortaya çıkan sonuçlarda, bu düzeltilmiş tüketim verileri kullanılmıştır. Gaz yakıt ölçümünde 1 dk süre içerisinde tüketilen yakıt miktarı tespit edilerek, saatlik tüketim belirlenmiştir. Doğalgaz tüketim değerinin ölçümü için, 0,04 m³/h'lik akış kapasitesine sahip G4 model sayaç kullanılmıştır. Biyogaz ölçümlerinde, daha fazla hacimsel tüketim gerçekleştiğinden 0,06 m³/h'lik akış kapasitesine sahip G6 model sayaç kullanılmıştır.

4.2.2 Doğalgaz ve biyogazın wobble indeksi (I_w)

Birbiri ile kıyaslanan iki gaz yakıt benzer wobble indeksine sahip ise, verilen basınç için enerji çıkışlarının da benzer olacağı kabul edilmektedir (TSE 7363). Doğalgaza alternatif olarak değerlendirilmek istenen yakıtların kullanımı analiz edilirken, mevcut sistemde meydana gelecek değişimlerin en aza indirgenebilmesi açısından Wobble indeksi önemlidir. Bu değer, aşağıdaki eşitlik ile alt ısı değere göre hesaplanmaktadır.

$$I_w = \frac{H_n}{\sqrt{d}} \quad (4.4)$$

Burada;

I_w : Wobble indeksi (MJ/m³)

H_n : Gaz yakıtın alt ısı değeri (MJ/kg)

d : Gaz yakıtın özgül ağırlığı (kg/m³) olarak ifade edilmektedir.

Doğalgazın ve % 60 CH₄ içeriğine sahip biyogazın wobble indeks değerleri sırasıyla $I_{w,NG} = 48,53$ MJ/m³, $I_{w,BG} \approx 27$ MJ/m³ olarak bulunmuştur. Düşük wobble indeksi nedeniyle biyogazın, doğalgaz yerine alternatif bir yakıt olarak kullanımının etkin olmayacağı görülmektedir. Ancak biyogazın çift yakıt gibi

farklı yöntemler ile kullanımı sayesinde etkinliği yüksek ve diğer yakıtlara alternatif olarak varlık gösterebileceği görülmektedir. Bu çalışmada da özellikle, doğalgazın alternatifi bir yakıt olarak çift yakıt sistemindeki etkinliği araştırılmaktadır.

4.2.3 Sıvı yakıt ölçümü ve özgül yakıt tüketimi

Sıvı yakıt tüketiminin ölçülmesinde 0,001 gr ölçüm hassasiyetine sahip Precisa XT 1220M model terazi ve bir süreölçer kullanılmıştır. Yakıt ölçümünde 1 dk süre içerisinde tüketilen yakıt temel alınarak farklı gaz yakıt/dizel karışım oranlarında ve farklı yüklerde bu sürede tüketilen yakıt miktarı tespit edilmiştir. Özgül yakıt tüketimi, birim güç başına tüketilen yakıt miktarını ifade etmektedir. Aşağıdaki formül kullanılarak motorun özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

$$b_e = \frac{B \times 1000}{N_e} \quad (4.5)$$

Burada;

b_e : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

B : Saatlik yakıt tüketimi (kg/h)

N_e : Efektif motor gücü (kW) olarak ifade edilmektedir.

4.2.4 Özgül enerji tüketimi

Özgül enerji tüketimi, birim gücün elde edilebilmesi için harcanan enerjiyi ifade etmektedir. Özgül enerji tüketimi;

$$\text{ÖET} = \frac{b_{eD} \times \text{LHV}_D}{1000} + \frac{b_{eG} \times \text{LHV}_G}{1000} \quad (4.6)$$

Formülü ile tespit edilmiştir.

4.2.5 Efektif verim

Motordan elde edilen enerjinin, motorda o anda tüketilen kimyasal enerjiye oranı olarak tanımlanan efektif verim aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \frac{3,6.10^6}{b_e \times LHV_D} \quad (4.7)$$

Burada;

η_e : Efektif verim

LHV : Alt ısı değeri (kJ/kg) olarak ifade edilmektedir. Çift yakıtlı motorların efektif veriminin hesaplanmasında, aşağıdaki denklem kullanılmaktadır. Bu formülle her iki yakıtın tüketim ve ısı değerleri kullanılarak efektif verim elde edilmiştir (Duc and Wattanavichien, 2007; Luijiten and Kerkhof, 2011; Cacua et al., 2012).

$$\eta_e = \frac{3,6 \times 10^6}{(b_{eG} \times LHV_G) + (b_{eD} \times LHV_D)} \quad (4.8)$$

Burada;

LHV_G : Gaz yakıtın alt ısı değeri.

LHV_D : Dizel yakıtının alt ısı değerini ifade etmektedir.

4.2.6 Yakıt değişim oranı hesabı

Çift yakıt sistemlerinde iki yakıt arasındaki değişim miktarı yakıt değişim oranı ile ifade edilmektedir. Burada karşılıklı olarak sıvı yakıtın gaz yakıt ile ikame edilebilirlik değeri gösterilmektedir. Özellikle maliyet ve pilot yakıt miktarının tayini için önemli bir parametredir (Papagiannakis and Hountalas, 2004; Duc and Wattanavichien, 2007; Luijiten and Kerkhof, 2011; Cacua et al., 2012).

$$Z = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_D + \dot{m}_G} \quad (4.9)$$

Burada;

Z : Sıvı ve gaz yakıt değişim yüzdesini,

$\dot{m}_D$: Pilot dizel yakıtının kütleli debisini,

$\dot{m}_G$: Ana yakıt olarak kullanılan gaz yakıtının kütleli debisini ifade etmektedir.

4.2.7 Yakıt eşdeğerlik oranı

Dizel motorlarında yakıt, hava debisine göre değil, yüke bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla bu motorlarda hava/yakıt oranı yerine yakıt/hava oranı kullanılmaktadır. Bir karışım içerisindeki yakıtın tamamının yanması için gerekli havayı içeren karışım stokiyometrik yakıt/hava oranı olarak adlandırılır. Bu karışımdan daha fazla yakıt içeren karışıma zengin karışım daha az yakıt içeren karışıma ise fakir karışım adı verilmektedir. Gerçek yakıt/hava oranının stokiyometrik yakıt/hava oranına kıyaslanması yakıt eşdeğerlik oranı olarak adlandırılmaktadır.

$$\text{Hava/Yakıt Oranı (H/Y)} = \frac{\dot{m}_h}{\dot{m}_y} \quad (4.10)$$

$$\text{Yakıt/Hava Oranı (Y/H)} = \frac{\dot{m}_y}{\dot{m}_h} \quad (4.11)$$

$$\phi = \frac{(Y/H)_{\text{gerçek}}}{(Y/H)_{\text{teorik}}} \quad (4.12)$$

şeklinde gösterilmektedir. Gerçek hava/yakıt oranının teorik hava/yakıt oranına hava fazlalık katsayısı (λ) denilmektedir. Hava Fazlalık Katsayısı;

$$\lambda = \frac{1}{\phi} \quad (4.13)$$

şeklinde gösterilmektedir.

4.2.8 Gürültü emisyonu ölçümü

Ses seviyesi ölçümünde, ses basınç seviyesi dB(A) biriminde ifade eden bir ses ölçer kullanılmıştır. Ölçümler TS EN ISO 11201 standardına uygun olarak, bir metre mesafede ve ses yönünde 90° açıyla mikrofonun ses kaynağına doğru hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Test öncesi tüm akustik kalibrasyonlar yapılmıştır. Teste başlamadan önce deney motoru çalışma sıcaklığına ulaşmaya kadar çalıştırılmıştır. Sonrasında hem tek yakıtlı hem de doğalgaz/dizel ve biyogaz/dizel çift yakıtlarında çeşitli yük kademelerinde testler tekrarlanmıştır. Cihazın ekranında görünen değerler istikrarlı hale gelinceye kadar beklenmiş, sonrasında 1 dakika süre içerisinde okunan değerlerin ortalaması alınarak sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Testler için, fabrikanın motor test ünitesinde vardiyanın olmadığı gece saatleri tercih edilmiştir. Fan ve diğer cihazlar da durdurulmuştur. Böylelikle tam bir sessizlik tesis edilmiştir. Jeneratörlerin ses yalıtım kabinleri özellikle kullanılmamış, ham gürültü emisyonu hedeflenmiştir.

4.2.9 Termal ölçümler

Silindir bloğu, silindir kapağı, emme manifoldu ve egzoz manifoldu sıcaklıkları termal kamera ile 1 m uzaklıktan ölçülmüştür. Bu ölçümler önce tek yakıtlı sonrasında ise sırasıyla doğalgaz ve biyogaz çift yakıtlı çalışma koşullarında yapılmıştır. Deney öncesinden tespit edilen noktalardan tüm yük ve yakıt koşullarına göre ölçümler alınmıştır. Termal görüntü kaydı ile birlikte normal görüntüleri de kayıt altına alınmıştır. Termal görüntülerin yer aldığı kayıtlar EK-1’de gösterilmektedir.

4.2.10 Titreşim testinin yapılışı

Yapılan bu çalışmada, TS ISO 8528-9 “Gidip Gelme Hareketli İçten Yanmalı Motorla Tahrik Edilen Alternatif Akım Jeneratör Gruplarının Mekanik

Titreşimlerinin Ölçme ve Değerlendirilmesi” standardına uygun olarak test düzeneği teşkil edilmiştir.

Titreşim bir diğer adı ile vibrasyon, makinaların mekanik aksamının iç ve dış kuvvetlere karşı gösterdiği tepkidir. Bu tepkinin bir nedeninin olması ve makinadaki sorun neticesinde ortaya çıkması açısından önemlidir. Titreşim analizinde yaparken dikkat edilmesi gereken iki önemli parametre vardır. Bunlardan birisi frekans diğeri de genliktir. Frekans, genel bir kavram olmakla birlikte belirli bir zaman periyodunda olayın oluş sayısı olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda periyodik titreşimlerin birim zamandaki tekrarlanma oranıdır.

Genlik ise titreşim sinyalinin büyüklüğü veya yer değiştirme olarak ifade edilmektedir. Genlik, yer değiştirme (μm), hız (mm/s) ve ivme (m/s^2) büyüklükleri ile ölçülmektedir. Buna göre frekans titreşim kaynağını, genlik ise titreşim büyüklüğünü ifade eder. Yer değiştirme miktarı, titreşim yapan parçanın yer değiştirdiği mesafeyi belirtmektedir. “Peak to Peak” şeklinde ölçülmektedir. Düşük frekanslı makinalarda bu ölçüm şekli tercih edilmektedir. Hız ölçümü ile yer değiştirmenin hangi hızda meydana geldiği tespit edilmektedir. Orta frekanslı makinelerde tercih edilmektedir. İvme, RMS birimi ile ifade edilmektedir. Bu birimle hızın ne kadar çabuk değiştiği ölçülür. Yüksek frekanslı makineler için uygundur.

İçten yanmalı motorlarda titreşim olayı iki farklı statüde değerlendirilmektedir. Motor içerisinde hareket etmekte olan parçaların meydana getirdiği titreşimler iç titreşimler olarak incelenirken, motorun genelinin tek bir parça gibi kabul edilerek burada meydana gelen titreşimler ise dış titreşimler olarak incelenmektedir (Rangwala, 2010; Öztürk, 2011; Singiresu, 2011). Bu çalışmada motor parçalarının meydana getirdiği titreşimlerden ziyade motorda kullanılan yakıtın meydana getirdiği titreşim değişimleri gözlenmiştir. İçten yanmalı motorlarda, yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjinin ısı enerjisine ve sonrasında ise mekanik enerjiye dönüşümü ile hareket elde edilmektedir. Isı enerjisi yüksek sıcaklık ve basınca sahip gazların piston tepesine etki ederek pistonun ve pistona bağlı biyel kolu ve krank milinin dönmesi sağlanmaktadır. Gazların yanması ile ortaya çıkan bu kuvvet, silindir kapağına etki ederek yukarı

yönlü, piston tepesine etki ederek ise aşağı yönlü motorun hareket etmesini zorlamaktadır. Aynı zamanda bu zorlama kuvveti iş zamanında piston ÜÖN'dan AÖN'ya inerken meydana gelen büyük yaslanma yüzeyinden motor bloğuna yatay doğrultuda etki eden bir kuvvetin de oluşmasına neden olur. Yatay doğrultuda meydana gelen bu kuvvet motor bloğunu krank mili eksenine etrafında dönme hareketi yapmaya zorlamaktadır (Wang, 2005; Solmaz, 2014).

Piston, ÜÖN ve AÖN'da iken doğrusal hızı sıfırdır. Motordaki atalet kuvvetlerinin büyük çoğunluğu doğrusal hareket eden parçalardan kaynaklanırken, üretim ve montaj esnasındaki hatalara bağlı olarak volan, krank mili, kasnak gibi parçaların dairesel hareketleri de bu ataleti etkilemektedir (Öztürk, 2011; Solmaz, 2014). Silindir içerisinde meydana gelen gaz basıncı ve krank mili açısı, hareketin sürekliliği nedeniyle anlık olarak değişmektedir. Bu duruma bağlı olarak da, silindirlerin yan yüzeylerine etkiyen kuvvet de sürekli değişim göstermektedir. Özellikle yüksek sıkıştırma oranına sahip motorlarda bu gaz kuvveti daha büyük boyutta meydana gelmektedir. Bu yanal kuvvetler öncelikle krank milinin sonrasında ise motor bloğunun titreşiminde çok önemli bir yere sahiptir. Ayrıca piston üzerine etkiyen gaz basınç kuvvetindeki ani değişimler pistonun silindir duvarlarına çarpmasına neden olur. Bu çarpma kuvvetleri de titreşim ve gürültü oluşumuna bir etkidir (Öztürk, 2011). İçten yanmalı bir motorda toplam yakıt enerjisinin % 5'i pistonda meydana gelen sürtünmelere harcanmaktadır. Motordaki toplam sürtünme kaybının % 20-45'i piston ile silindir arasında meydana gelmektedir (Taylor, 1993; Kim, 2005; Öztürk, 2011; Solmaz, 2014).

Piston-biyel-krank mekanizmasının dışında diğer motor ekipman ve parçaları (klima kompresörü, alternatör, devir daim pompası, vantilatör mekanizması ve kayışı, triger zinciri/dişlileri, subap ve kam mekanizması vb.) da sürtünme ve titreşim oluşuma etki etmektedir. Motor parçalarında meydana gelen bu kuvvetler, parçanın hızına, parçanın kütlesine, sıcaklığa vb. değişkenlere bağlı gelişmektedir. Motorda kullanılan soğutma sıvısı ve yağlama yağı, silindir içerisine alınan hava ve dışarı atılan egzoz gazı gibi akışkanlar da belirli bir miktar atalet kuvveti meydana getirmektedirler. Karterde bulunan ve sürekli çalkalanan motor yağı, soğutma kanallarındaki soğutma sıvısının yön değiştirmesi ve

çalkalanması, çarpma ile yağlamalı sistemlerde piston-krank-biyel mekanizmasına çarpan yağ motor titreşimlerine etki eder (Öztürk, 2011; Solmaz, 2014).

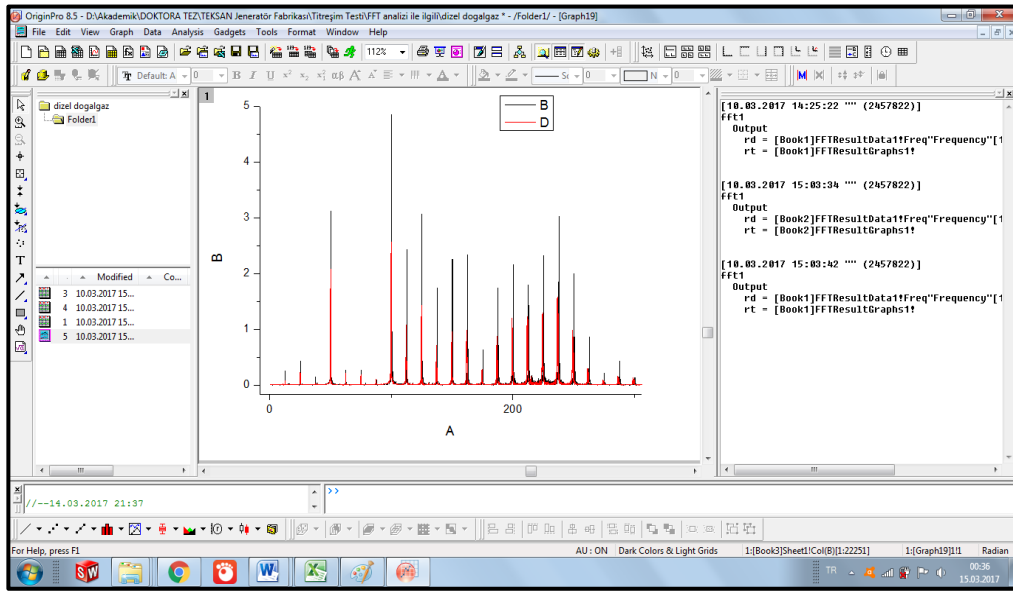
Testlerde, yer değiştirme, hız ve ivme'nin rms değerlerini, 10 Hz ile 1000 Hz aralığında %10'luk hassasiyette ve 2 Hz ile 10 Hz aralığında % +10, % -20' lik bir hassasiyet sağlayacak ekipman kullanılmıştır. Bu değerlerin tespitinde, bütünleşik sinyale sahip tek bir sensör kullanılmıştır. Sismik sensör, titreşimlerin en çok hissedildiği motorun bağlantı ayaklarına yerleştirilmiştir. Bunun için ayak üzerindeki tüm kir ve boyalar temizlenmiş ve ideal bir yüzey tesis edilmiştir. Ölçümler motor çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra yapılmaya başlanmıştır. Öncelikle dizel yakıtlı çalışma koşulunda sonrasında ise doğalgaz/dizel ve biyogaz/dizel çift yakıtı koşulunda ölçümler yapılarak “Titreşim Yer Değiştirmesi (μm)”, “Titreşim Hızı (mm/s)” ve “Titreşim İvmesi (m/s^2)” olarak farklı farklı kaydedilmiştir. Ölçümler, tüm çalışma koşullarında (dizel, doğalgaz/dizel çift yakıtlı ve biyogaz/dizel çift yakıtlı) ve her yük kademesinde 10 saniyelik süre boyunca 23800 farklı titreşim verisi kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler “Hızlı Fourier Dönüşümü” yöntemiyle Origin 8.5 programında analiz edilmiştir.

Hızlı Fourier Dönüşümü; titreşim analizinde kullanılan, istatistik tabanlı matematiksel bir işlemdir. Karışık sinyal yumaklarının ayrıştırılması ve herhangi bir frekansta ne şiddette bir titreşim olduğunu göstermektedir. Literatürde kısaca FFT analizi olarak da tanımlanan bu yöntem sinyallerin zaman alanından frekans alanına geçirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde tekrarlanmayan sinyaller dikkate alınmaz iken karmaşık sinyaller içinde periyodik olanları belirleyip bileşenlerine ayırır. Periyodik ve sonlu değer alabilen her fonksiyon, değişik frekanslarda titreşen sinüs ve/veya kosinüs bileşenlerinin toplamından meydana gelmektedir (Aydın, 2013; Kelleci vd., 2014).

Dizi eleman sayısının veya veri sayısının çok fazla olduğu durumlarda dönüşümlerin gerçekleştirilmesi için uzun zamana ihtiyaç duyulduğundan normal dönüşüm metotlarının aksine Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmaktadır. Burada temel olarak N adet kompleks $x(n)$ veri serisi N adet $X(k)$ serisine aşağıdaki eşitlik kullanılarak çevrilmiştir (John, 2007). Bu çevrime ilişkin geliştirilmiş formül Eşitlik 4.14'de gösterilmiştir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-i*(2\pi*k*\frac{n}{N})} \quad (4.14)$$

OriginPro 8.5 programında zaman ve ivmeden oluşan titreşim verileri işlenerek Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, frekans ve genlik grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerde dizel, dizel/doğalgaz ve dizel/ biyogaz çalışma koşulları birbiri üzerine bindirilerek verilmiştir. Her bir yük için bu analiz tekrarlanarak grafikler elde edilmiştir.

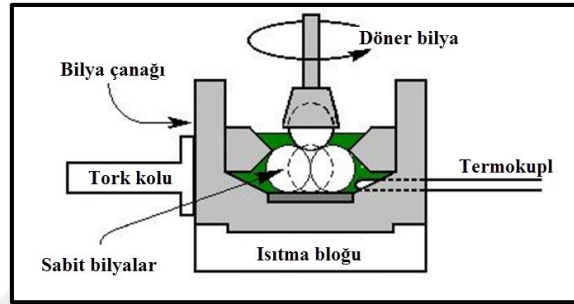


Şekil 4.17 OriginPro 8.5 programı FFT analiz görüntüsü.

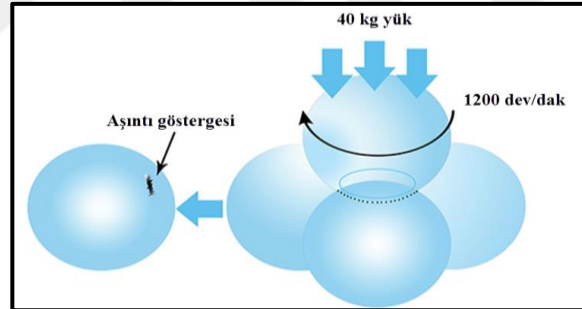
4.2.11 Yağ numuneleri ve dört bilye testi

Motora alınan biyogazın içeriğinde bulunan H_2S 'in çeşitli yağlarda meydana getirdiği bozulmaları görebilmek ve mevcut gaz motorları yağları arasında bir kıyas ve sıralama yapabilmek amacıyla dört bilye deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde dört adet farklı markada yağa % 1 oranında H_2SO_4 eklenerek bozunmaya tabi tutulmuştur. Sonrasında ise bu yağ numuneleri OPET FUCHS (İzmir) akredite laboratuvarında test edilmiştir. Testlerde aynı yağın orijinali ile H_2SO_4 eklenip bozulması sağlandıktan sonraki farklar ortaya çıkarılmıştır. Dört bilye deneyi ASTM D4172 test metodu kullanılarak yapılmıştır. ASTM D4172 standardı, dört bilyeli aşınma test makinesi yardımıyla sürtünmeli akışkanların aşınma önleyici özelliklerinin değerlendirilmesi

prosedürünü kapsamaktadır. Bu yöntemde 12,7 mm çapında ve 64-66 Rc sertlikteki dört adet metal bilye kullanıldığından teste bu isim verilmiştir. Bu testte temel olarak üç adet paslanmaz çelikten imal edilen bilye altta yer alırken bir adet bilye ise üstte bulunmaktadır (Şekil 4.18). Test edilecek akışkanların aşınma önleyici özellikleri mikroskop kullanılarak tespit edilmektedir. Bunun dışında, bilye yüzeyinde meydana gelen bozulma çapı ve hacimsel hesaplama olarak da çıktılar alınabilmektedir (Zulkifli, vd., 2013).



Şekil 4.18 Dört bilye testi şeması.



Şekil 4.19 Dört bilye düzeneği.

Üstte bulunan bilye, 392 N yük, 1200 min⁻¹ devirde döndürülürken, akışkan yağlayıcı numunelerin sıcaklıkları 75 °C sabit tutulmuştur. Test süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Bu test tüm numuneler için tekrarlanmıştır. Dördü % 1 oranında asit ilavesi yapılarak krakinge uğratılmış yağlar, dördü ise orijinal olmak üzere toplam 8 adet yağ numunesi denenmiştir. Testlere başlamadan önce tüm deney bilyeleri tolüen ile iyice temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutulmaları sağlanmıştır. Şekil 4.19’da gösterildiği gibi, alttaki bilyelerin yüzeylerinde meydana gelen bozulma, aşınma gibi olaylar gözlenmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Kullanılan yağ örneklerinin her biri farklı firmaya aittir. Deney sonuçlarına

kıyaslama getirmesi ve akademik alandaki bu çalışmanın firmaların etik kurallarına uymayabileceği değerlendirildiğinden, yağ marka/modelleri gizli tutulmuştur.

4.2.12 Motor yataklarının uzun süreli testleri

H₂S içeren biyogazın, motor yağında meydana getireceği kriting ile yatak ve yatak malzemelerinde oluşacak bozulma ve aşınmaları görebilmek maksadıyla testler yapılmıştır. Motor yağı içerisindeki H₂SO₄, yakıt içerisindeki kükürt türevi katkıların varlığından ve/veya motor yağı içerisindeki kükürt türevlerinin su buharı ile birlikte reaksiyona girmesi neticesinde meydana gelmektedir. Bu durum aşağıdaki kimyasal reaksiyonlar ile açıklanmaktadır. Buna göre, yanma odası içinde bulunan H₂S, yanma esnasında SO₂ ve su buharı oluşturur (Eşitlik 4.15). Yoğuşma ile su sıvı formuna dönüşür. Yanma devam ettiği için ortamdaki SO₂ ile O₂ tepkimeye girer ve SO₃ oluşturur (Eşitlik 4.16). Yanma esnasında hızlı bir şekilde oluşan SO₃ ve mevcut su birleşerek H₂SO₄ oluşturur (Eşitlik 4.17). Eşitliklerde de görüleceği gibi sitokiyometrik olarak tepkimeye giren H₂S ile oluşan H₂SO₄ oranı 1:1'dir. Dolayısıyla reaksiyona giren H₂S kadar H₂SO₄ oluşmaktadır.



Motor kapasitesine uygun miktarda yağa % 1 oranında H₂SO₄ ilavesi yapılarak H₂S'in H₂SO₄'e dönüşümüne bağlı yağdaki değişimler simule edilmeye çalışılmıştır. Saha çalışmalarında kullanılan ham biyogazın içerisinde atığa ve prosese bağlı olarak çok değişken oranlarda H₂S oluşumu görülmektedir. Bu dalgalı H₂S oluşumu, yağ ve motor parçalarına ilişkin çalışmalara referans teşkil edebilecek net bir değerlendirme yapma şansını ortadan kaldırmaktadır. Bu durum yağdaki bozunmaların süresi açısından değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca yanma esnasında meydana gelen reaksiyon sonucunda oluşan H₂SO₄'ün büyük kısmının da egzoz zamanında dışarı atılmakta olduğu göz önünde bulundurulması

gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada standart olarak % 1 oranında H_2SO_4 katkısı tercih edilmiştir.

Sıcaklığı sabit tutularak bozulmaya maruz kalmış farklı yağ örneklerinin bakır çubuklarda meydana getirdiği bozulmalar da incelenmiştir. Çubukların bir kısmı yağın içerisinde bir kısmı ise yağın dışında kalacak şekilde askı düzeneği hazırlandıktan sonra 24 saat süre boyunca $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de bekletilmiştir. Üç farklı yağ örneğinde (Bir önceki bilye deneyinde en iyi sonuçları veren 3 yağ numunesi kullanılmıştır.) gerçekleştirilen deney sonucunda bakır çubuklardaki değişimler izlenmiştir.

4.2.13 Özgül enerji maliyeti

Deneylerde kullanılan yakıtların birim maliyetlerine dayalı olarak özgül yakıt tüketim maliyetleri ve sürdürülebilirlik olanakları da konuyu bütünlüğünün sağlanabilmesi maksadıyla incelenmiştir. Bunun için dizel yakıtının pompa litre fiyatı, doğalgazın m^3 fiyatı ve biyogazın m^3 maliyeti tespit edilmiştir.

Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsünce yapılan önceki kurumsal çalışmalarda/projelerde elde edilen verilerden de faydalanarak 25 kW güce sahip bir jeneratör motorunun ihtiyaç duyacağı biyogaz miktarı hesaplanarak biyogaz tesisi maliyeti çıkarılmıştır (Ege Üniversitesi, 2016). Bu kapsamda sistemin toplam kurulum maliyeti 121.300 \$ olarak belirlenmiştir. Sistemin işletim ömrü 20 yıl olarak kabul edilmiş ve müteakip paragraflardaki hesaplamalarda bu süre kullanılmıştır.

Elektrik üretimi, sistemin bakımı ve muhtemel arıza durumları düşünülerek çalışma süresi 8.300 saat/yıl olarak alınmıştır. 20 yıllık süre içerisinde toplam elektrik üretiminin 207.500 kWh (207,5 MWh) olduğu belirlenmiştir. Biyokütle kaynaklarından lisansız elektrik üretimi için belirlenen 13,3 dolar sent'lik teşvik ile birlikte bu tesisten yıllık elektrik üretim gelirinin 26.000 \$ olacağı tespit edilmiştir (Ege Üniversitesi, 2016).

Isı üretimi, kurulması planlanan tesiste kojenerasyon özelliği olmayan jeneratör kullanıldığından ısı üretimine yönelik bir değerlendirme yapılmamıştır.

Fermente gübre üretimi, biyogaz üretim prosesi sonucunda geriye azot yönünden zengin fermente atık oluşmaktadır. Bu atık Avrupa ülkelerinde ticari olarak büyük bir pazara sahip iken ülkemizde konunun yeni önem kazanması sebebiyle pazar payında belirsizlikler yaşanmaktadır. Söz konusu belirsizliklere bağlı olarak ticari anlamda da değişkenlikler ortaya çıkabilmektedir. Normal şartlarda bu atığın mali değeri 16 \$/m³ olarak belirtilmektedir. Ancak daha önce de ifade edildiği gibi pazardaki belirsizlikler ve değişkenler olması nedeniyle atık olarak nitelendirilen organik gübrenin ancak % 20'sinin ticari bir değere dönüşebilmesine olanak sağlamaktadır. Sistemin kapasitesi, üretim miktarı ve proses özellikleri de dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda organik gübre üretiminden elde edilecek getirinin 16.180 \$/yıl olacağı tespit edilmiştir.

Organik atık giderimi, biyokütle temelli enerji üretiminin diğer yenilenebilir enerji sistemlerinden farkı, enerji üretimi yanında organik kirleticilerin arıtımının da sağlanmasıdır. Bu giderim faaliyetinin ekonomik analize yansıtılması, fizibilite çalışmalarının gerçekçiliğini artırmakta, geniş perspektifte değerlendirilmesini sağlamaktadır. Ancak ülkemizde fermente gübrede karşılaşılan sıkıntı ve sorunlar, atık bertaraf maliyetinde de kendisini göstermektedir. Bu nedenle bir takım kabullerde bulunmak gerekmektedir. Bu kabullerde, atıkların en azından taşıma maliyetlerinin belirlenmesi önemlidir. Ancak bu durumda da atıkların intikal ettirileceği mesafe ön plana çıkmaktadır. Tüm bu zorluklar göz önüne alındığında, iyimser bir tablo çizmemek için atık bertarafına yönelik olarak m³ başına 1,2 \$ gibi düşük bir değer kabulü yapılmıştır. Bu kapsamda, yıllık 3.700 \$ atık gideriminden dolayı getiri sağlanmış olacaktır.

İçsel elektrik tüketimi, tesisin kapasitesi ve işletimine yönelik olarak yapılan hesaplamalarda sistemin elektrik tüketimine (sistem ihtiyacı olan elektrik enerjisi üretilen elektrikten karşılanacağı değerlendirilmektedir) bağlı olarak ortaya çıkan giderin 11.800 \$/yıl olacağı belirlenmiştir.

Bakım ve onarım giderleri, elektromekanik cihazlar, içten yanmalı motor vb. ekipmanların sorunsuz çalışabilmesi için bir takım bakım ve onarım faaliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. İçten yanmalı motorun yağ, yağ filtresi, dizel yakıt pompası bakımları, yakıt filtresi, kayış kasnak vb. yedek parça değişim ve/veya onarımlarının giderleri üretilen kWh enerji başına 1,2 \$ olarak kabul edilmiştir. Diğer ekipmanlar için ilk yatırım maliyetinin % 1'i bakım ve onarım maliyeti olarak alınmıştır. Bu sayede planlanan tesisin genel bakım onarım harcamalarının 4.000 \$ olacağı öngörülmüştür.

Personel harcamaları, işletmenin kendi insan kaynaklarıyla faaliyetini sürdüreceği varsayıldığından bu harcamalar değerlendirmeye katılmamıştır.

Yukarıda yapılan hesaplama ve kabuller çerçevesinde tesisin yıllık işletme maliyeti 15.822 \$ olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde bu tesisin yıllık gelirinin ise 45.847 \$ olduğu ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak tesisin işleme başlaması ile yıllık net olarak 30.025 \$ getiri elde edilebilmektedir.

Kurulması planlanan tesisin Net Bugünkü Mali Değeri (NBMD) ortaya çıkarılmıştır. Buna göre, 20 yıllık süre gözönünde bulundurulduğunda sistemi teşkil eden ekipmanların hurda değerleri de hesaplamalara dâhil edildiğinde, NBMD 132.490 \$ olarak tespit edilmiştir. Bu değer;

$$MNBD = C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (4.19)$$

eşitliği ile elde edilmiştir (Brealey et all, 1997; Brigham, E.F., 1989). Burada;

C_0 : İlk yatırım maliyeti.

C_n : Yıllık net getiri.

r : Sermayenin fırsat maliyetini ifade etmektedir. Ayrıca bu sistemin iç karlılık (iç verim) oranı da hesaplanmıştır. Buna göre sistemin iç karlılık oranının % 24,4 olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde sistemin geri ödeme süresinin de 6 yıl olduğu yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir.

Yukarıda elde edilen bilgilerden anlaşılaçağı üzere, biyogaz maliyetinin 6 yıl gibi kısa bir sürede masraflarını karşılayabildiğı dolayısıyla biyogaz birim maliyetinin olmadığı görölmektedir. Ancak diğ er yakıtlarla mali açıdan kıyasının yapılabilmesi maksadıyla biyogaz birim maliyeti yıllık masraflar üzerinden gidilerek hesaplanmıştır. Bunun için tesis maliyeti, yıllık amortisman değ eri olarak gösterilmiş, elektrik giderlerinin elektrik üretiminden karşılanması sebebiyle iptal edilmiş ve ortaya yıllık bazlı ortalama bir maliyet miktarı çıkarılmıştır.

Yıllık bazlı biyogaz tüketimine ve yıllık giderlere göre birim maliyet hesabı yapıldığında biyogazın birim maliyetinin 0,1 \$/m³ olduğu belirlenmiştir (Burada hem ısı değ er üzerinden hem de tüketim değ eri üzerinden hesaplamalar yapılmış ve yüksek çıkan veri üzerinden değ erlendirme yapılmıştır). Motorinin İstanbul ili genelinde Ekim 2017 ortalama fiyatının 1,26 \$/l, doğ algazın ortalama fiyatının ise aynı tarihler için 0,33 \$/m³ olduğu tespit edilmiştir (Petrol Ofisi, 2017; İğ daş, 2017).

4.2.14 Deneyin yapılışı

Deneye başlamadan önce dizel yakıt pompası, enjektör püskürtme basınçları (200 bar), püskürtme avansı (15°±1) ve subab ayarları (soğ uk motorda emme ve egzoz subapları için 0,3~0,35 mm) motor katalog değ erlerine göre ayarlanmış ve motor yağı değ iş tirilmiştir. Mikser olarak 73 kW'lık kapasiteye sahip model seçilerek motor ile mikserin kapasite uyumu sağ lanmıştır.

Deneyler, TSE 1231 Motorlu Taşıtlar-Muayene ve Deney Esaslarında belirtilen “Sabit Devirli Motor Deneyleri” standardına uygun olarak yapılmıştır. Motor çalışma sıcaklığına getirildikten sonra alış tırma testleri yapılarak motor yağ basıncının yeterli seviyede olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sabit devirde, yük değ iş imlerine bağı lı olarak motor anma devrindeki en yüksek değ iş im 3 min⁻¹ olarak kaydedilmiştir. Testler 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW ve 25 kW'lık yük aralıklarında, 1500 min⁻¹ sabit devirde gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncelikle konvansiyonel dizel yakıtı ile tek yakıtlı çalışma koşulunda gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, doğ algaz/dizel çift yakıtlısı ile testler tekrar edilmiş, son olarak da

biyogaz/dizel çift yakıtlısı denenmiştir. Doğalgaz ile yapılan çift yakıtlı testlerden sonra motor yeniden tek yakıtlı çalışma koşuluna getirilerek dizel yakıtı ile çalıştırılmıştır. Bu sayede doğalgazın yanma odasında kalmasının muhtemel etkileri ortadan kaldırılmıştır. Doğalgazlı çift yakıt testlerinin ardından biyogaz/dizel çift yakıt koşuluna göre yukarıda ifade edilen prosedürlere uygun olarak testler gerçekleştirilmiştir. Test süresince motor soğutma suyu sıcaklığı 78 °C sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Aynı şekilde motor yağ basıncının yük ve motor sıcaklığının artışına bağlı olarak, 2,7 bar basınca kadar düştüğü izlenmiştir. Bu değer katalog değerleri ile kıyaslandığında yağın ideal çalışma basıncı olduğu görülmüştür. Yük değişimlerinden sonra motorun çalışması kararlı hale getirilip egzoz gaz sıcaklığı, emisyon değerleri, titreşim miktarı, termal görüntü kaydı, gürültü emisyonu, gaz ve sıvı yakıt tüketimleri ölçülmüştür.

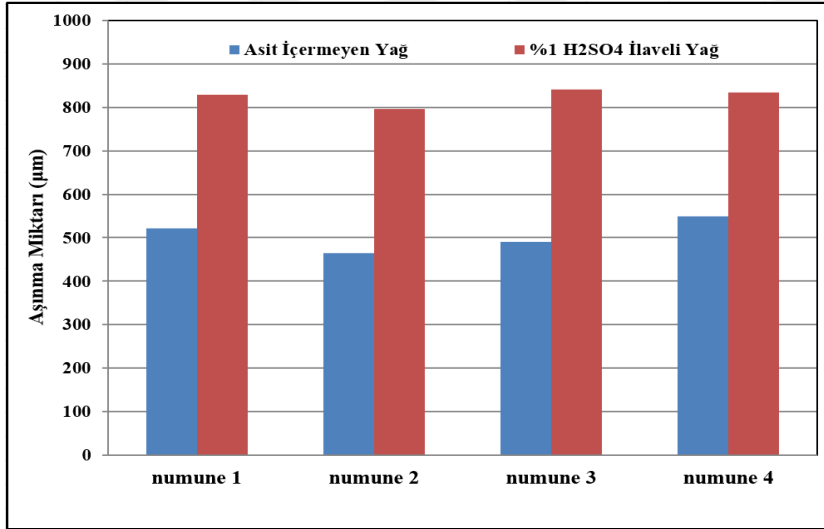
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Dört Bilye Testi ve Yatak Malzemelerine Etkileri

Motorlar için tasarlanmış ve özellikleri Çizelge 4.12-15’de verilen dört farklı markaya ait yağ numunelerine OPET FUCHS (İzmir) laboratuvarlarında ASTM D4172 standartlarına uygun olarak dört bilye testi yapılmıştır. Yağ numunelerinin orijinal ve asit ilaveli test verileri kaydedilerek aralarındaki aşınım miktarları Çizelge 5.1’de ve Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Dört Bilye deneyi aşınım miktarları.

1.Numune		2.Numune		3.Numune		4.Numune	
Normal Yağ Aşınımı	Bozulmuş Yağ Aşınımı	Normal Yağ Aşınımı	Bozulmuş Yağ Aşınımı	Normal Yağ Aşınımı	Bozulmuş Yağ Aşınımı	Normal Yağ Aşınımı	Bozulmuş Yağ Aşınımı
522 μm	830 μm	465 μm	797 μm	490 μm	842 μm	550 μm	834 μm
Fark: 308 μm		Fark: 332 μm		Fark: 352 μm		Fark: 284 μm	



Şekil 5.1 Sülfürik asidin yağ numunelerine etkileri

Biyogazın ihtiva ettiği H_2S , yanma esnasında bir dizi reaksiyon ile sülfürik aside dönüşmektedir. Bu kapsamda biyogazın kullanımı neticesinde yağda % 1 oranında H_2SO_4 birikimi olacağı kabul edilmiştir.

Testler sonucunda, bozulmaya maruz bırakılmayan 1 numaralı numunede test sonucunda normal aşıntı miktarı 522 μm olarak ölçülürken % 1'lik bozulma sonrasında bu aşıntı 830 μm olmuştur. 2 numaralı yağda asit ilavesinden önce 465 μm olan bilye aşıntı miktarı, asit katılması neticesinde 797 μm değerine; 3 numaralı yağda 490 μm 'den 842 μm 'ye ve 4 numaralı yağda ise 550 μm 'den 834 μm 'ye çıkmıştır.

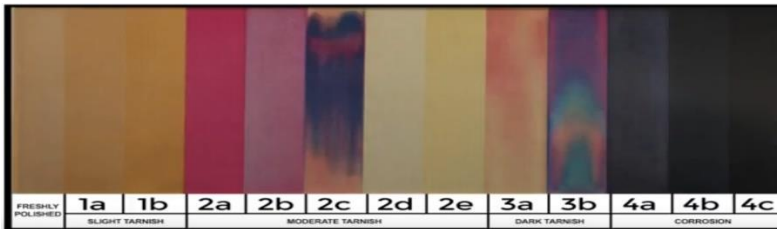
Aşıntı artış oranları açısından incelendiğinde 1 numaralı numunede % 59, 2 numaralı numunede % 71,4, 3 numaralı numunede % 71,8 ve 4 numaralı numunede ise % 51,6 değerleri elde edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında 2 ve 3 numaralı yağların, biyogazın içerisindeki H_2S 'in etkisiyle yağlayıcılık/aşıntı önleyicilik özelliklerini daha çabuk kaybettiği ve dolayısıyla kritik motor parçalarında hızlı bir aşınmaya sebep olacağı görülmektedir. Biyogaz kullanımı neticesinde motor yağında oluşabilecek % 1'lik H_2SO_4 birikiminin yağın % 71 oranında bozulmasına neden olabileceği tespit edilmiştir.

Aşınma, birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerde, yüzeyler arasındaki boşluğun değişmesi sonucunda oluşan metal kayıplarıdır. Dolayısıyla bu durumun süreklilik haline gelmesi neticesinde malzemede bozulma olması kaçınılmazdır. Özellikle motorların ilk harekete başlama ve durma süreçlerinde, rodaj döneminde bu durum ile karşılaşılabilir. Metal-metal teması, yağa yüzeyler arasında film yapıcı maddeler ilave edilerek engellenmeye çalışılmaktadır. Bu malzemeler ise metal yüzeyleri absorpsiyon veya kimyasal reaksiyon ile koruyabilmektedir. Aşınma önleyici katkı maddeleri arasında en önemlileri, sülfür, fosfat ve çinko bileşikleridir (Rudnick, 2003; Müjdeci ve Kaleli, 2010). Madeni yağlar, depolanmaları ve kullanılmaları esnasında sürekli dış etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkilerin yağlardaki en önemli sonucu karbon ve hidrojen atomlarından oluşan moleküllere oksijen girişini sağlayarak yağın asitlenmesidir. Bu nedenle üretici firmalar yağdaki bu asitlenmeyi dengeleyebilmek amacıyla alkalin katkı maddeleri kullanmaktadır. Baz tabanlı bu katkılar, yağın “Toplam Baz Sayısı (TBN)” olarak ifade edilmekle birlikte yağın asit absorbe edebilme yeteneğinin de bir göstergesidir (Gökalp vd, 2007).

Yağın doğasında asitlenmeye karşı bir eğilim bulunurken, H_2S ün, yanma reaksiyonu içerisinde H_2SO_4 'e dönüşmesi ile yağda bulunan alkali tabanlı bu katkı maddelerini çok hızlı bozabildiği görülmektedir. Bu bozulma sonucunda da yağın yağlayıcılık ve aşınma önleyici özelliklerini kaybettiği test sonucunda ortaya çıkmıştır. Biyogazın kullanıldığı motorlarda, tercih edilecek yağın, motor ömrünün tayininde ve sisteminin sürdürülebilirliğinde çok önemli olduğu, gaz içeriğinde bulunan H_2S 'in eser miktarlarının dâhi öncelikle motor yağını, sonrasında ise motorun kritik parçalarını olumsuz etkileyeceği görülmektedir. Bozulan yağın bakır çubuklarda meydana getirdiği değişimler ise Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Bu testte H_2S 'in varlığı neticesinde ortaya çıkan H_2SO_4 'ün daha az etkilediği 3 yağ (1, 2 ve 4 numaralı numuneler) kullanılmıştır. 150 °C sıcaklıkta sabit tutulan yağ numunelerine, bir kısmı yağın içerisinde bir kısmı ise yağın üzerinde olacak şekilde konumlandırılmış bakır çubuklar daldırılarak 24 saat süreyle bu şekilde bekletilmiştir. Test sona erdikten sonra çubuklarda meydana gelen görsel bozulma ve kraking etkileri Şekil 5.2'de, renk skalası ise Şekil 5.3'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Bakır çubuk örnekleri.



Şekil 5.3 Renk skalası.

Buna göre, 1 numaralı yağda bulunan çubuğun yağın içerisinde yer alan kısmında fiziksel olarak önemli bir değişim gözlenmez iken yağın dışında kalan

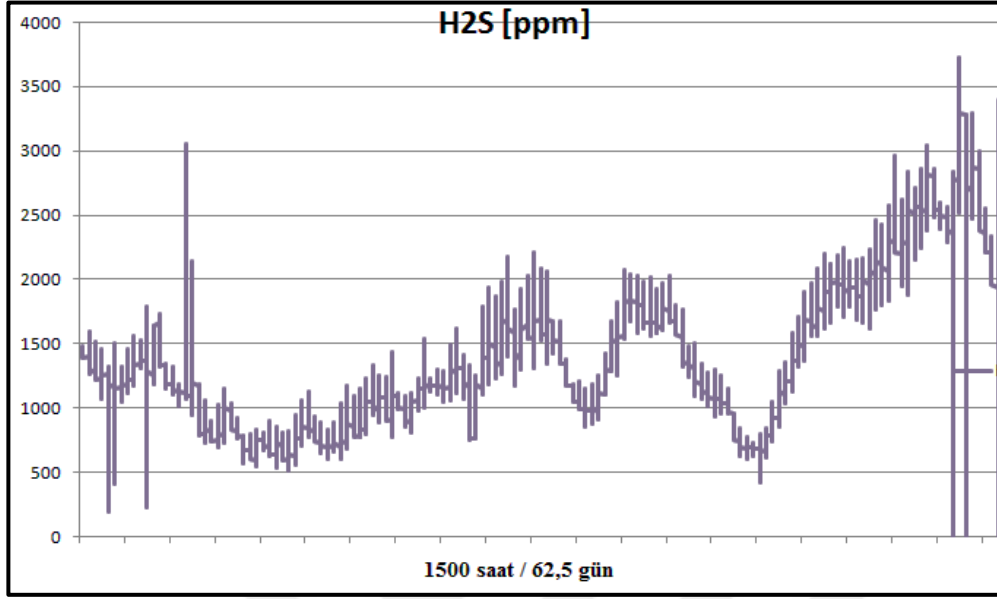
bölgede önemli miktarda korozif etkiye maruz kaldığı görülmüştür. Benzer şekilde 4 numaralı yağda bulunan çubuğun da etkilendiği ancak bu etkinin daha az olduğu tespit edilirken 2 numaralı yağda bulunan çubuğun tamamının etkilendiği gözlenmiştir. 1 ve 4 numaralı yağda bulunan bakırın alt kısımlarında (yağ içerisindeki) koyu portakal renginde (1b) iken yağ buharına temas eden üst kısımlarda grafit veya mat siyah (4b) rengini aldığı tespit edilmiştir. 2 numaralı yağdaki çubuğun bütününde koyu siyah ve grafit (4b ve 4c) şeklinde korozyonun meydana geldiği belirlenmiştir.

Özellikle yağın dışında kalan bakır çubuk kısımlarının yağın içinde kalan kısımlarına nazaran daha hızlı bir bozulmaya maruz kalmasının, yüksek sıcaklık altındaki yağ buharı ve içeriğindeki % 1 oranındaki H_2SO_4 'ün buharlaşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Yağ dışında kalan bakır çubukların hepsi bu buhardan benzer şekilde etkilenmiştir. Bu durumun yağlarda kullanılan korozyon katkılarının asit ile birlikte hızlı olarak bozulmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Asit buharının yağ içerisindeki asitten daha hızlı bir fiziksel ve kimyasal bozulma eğilimi gösterdiği görülmektedir.

Sonuç olarak, içeriğinde % 1 asit ihtiva eden 1 ve 4 numaralı yağ numunelerinin 2 numaralı numuneye kıyasla daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Dört bilye testi sonuçları ile bakır çubuklarda meydana gelen bozulmalar birbiri ile örtüşerek yağ numunelerinde anlamlı bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Buna göre biyogazın içeriğindeki H_2S miktarı düşük bir değerde dâhi olsa motor yağının kullanım ömrünü ciddi oranda kısaltmaktadır. Bu nedenle biyogaz kullanımının söz konusu olduğu durumlarda, motor yağları önceden test edilerek yeni duruma uygun bir kullanım ömrü belirlenmesi gerekecektir. Aksi takdirde önce yağda meydana gelen bozulma, sonrasında motor yataklarına ve motorun diğer parçalarına ilerleyerek ciddi hasarlara yol açacağı değerlendirilmektedir.

Bu laboratuvar testlerinin ardından, sahada kullanılan biyogaz motorları incelenmiştir. TEKSAN Jeneratör Fabrikasında, 1 MW gücündeki gaz motorunun turbo yatakları incelenmiştir. Bu motorda yakıt olarak kullanılan biyogazın ihtiva ettiği H_2S değerleri, Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Bu değerlerin gerçek kullanım

şartlarında da görüldüğü gibi atığın içeriğine ve fermentasyon sürecine bağlı olarak günlük değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.4 1500 saatlik süresince H₂S değişimi.

İki aylık süre içerisinde ortalaması 500-2000 ppm seviyelerinde ve sürekli dalgalı bir H₂S üretimi olduğu görülmektedir. Bu değişken durumun motor bakımında ve yağ değişiminde de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Buna göre söz konusu motorun turbo yatakları sıfırlandıktan sonra 750 saatlik kullanım neticesindeki görseli incelenmiştir. Müteakiben motor, 750 saat daha çalıştırılarak (toplam 1500 saatlik) turbo yatakları görsel olarak da incelenmiştir. Yataklarda meydana gelen korozyon ve bozulma etkileri Şekil 5.5 (a) (b), ve (c)'de gösterilmiştir.



(a) Orijinal turbo yataklarının test öncesi görünümü.



(b) 750 saatlik kullanım sonrası turbo yataklarının görünümü.



(c) 1500 saatlik kullanım sonrası turbo yataklarının görünümü.

Şekil 5.5 Turbo yataklarının kullanım sonrası görünimleri.

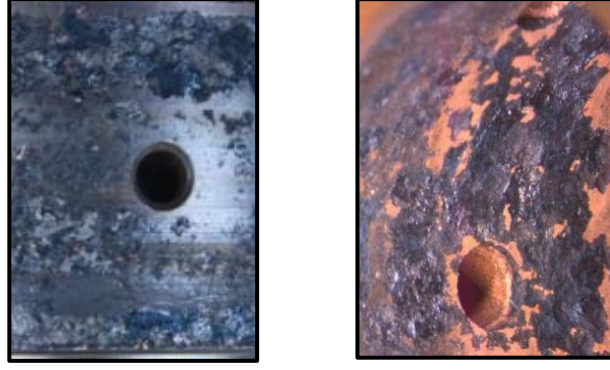
Şekil 5.5 (a)'da motorda kullanılan turbo yatak malzemelerinin kullanım öncesi orijinal görseli sunulmuştur. (b)'de ise 750 saatlik kullanım neticesinde yatakta meydana gelen ve gözle görülebilen değişim izlenmektedir. Ve son olarak (c)'de ise 1500 saatlik kullanım neticesinde yataktaki nihai bozulma gösterilmiştir. Yatakların bu şekilde bozulmasına asitlerin yatak metalinin oksitleri ile kimyasal reaksiyonu sonucu meydana gelmektedir. Yağın zamanla oksitlenmesi veya her hangi bir şekilde asit ile karışması neticesinde ortaya çıkan bozucu/korozif etkinin de önemli olacağı değerlendirilmektedir. Yağdaki korozyon inhibitörleri, metal yüzeyler üzerinde oluşturduğu koruyucu film tabakası sayesinde eksik yanma ürünü vb. hafif korozyon kaynaklarını nötralize etmektedir. Ancak bu etkiyi yaratacak yağın öncelikle bozulması ve inhibitörlerinin devre dışı kalmasıyla yataklar her türlü zararlı etkiye açık hale geldiğinden su buharının bile korozif etkisi hayati olabilmektedir (Bunakov et al., 1983; Mahle, 2017; Barden, 2017). Bu durumun, çok daha uzun kullanım ömrü

bulunan birçok parçanın kısa sürede bakıma alınmasına ve bunun neticesinde ise zaman ve para kayıplarına sebep olacağı düşünülmektedir .

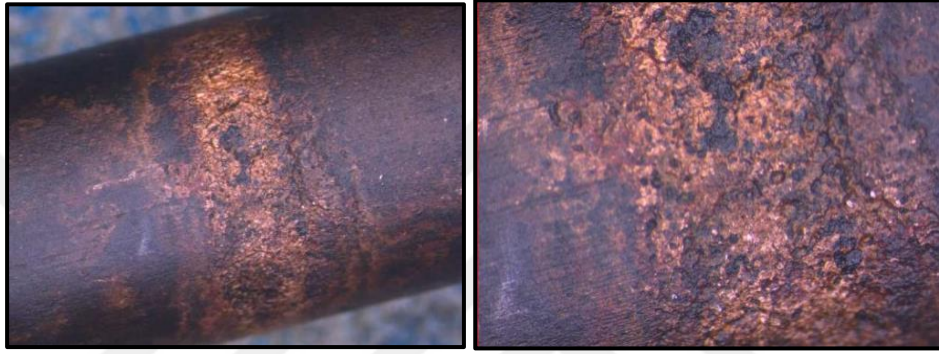
Korozif etkinin dışında, motor yağlarının sıcaklık farkından etkilenmesini en aza indirebilmek maksadıyla viskozite düzenleyici katkıları da kullanılmaktadır. Özellikle çok dereceli yağların geniş bir sıcaklık aralığında viskozitesinin çok değişmemesi ve bu değişikliğin de belirli sınırlarda kalması beklenmektedir. Bu katkı maddeleri uzun zincir yapılı ve esneyip genişleyen bir yapıya sahip polimer molekülleridir. Esneyip genişleyen bu moleküller, incelen yağın içerisinde direnç oluşturarak yağın viskozite kaybını en aza indirmektedir (Müjdecı ve Kalelı, 2010). Dolayısıyla yataklarda meydana gelen sürtünme izleri incelendiğinde; yağdaki asitin, bu polimer yapıyı parçaladığı, yağın yüksek sıcaklıklarda viskozite direncini koruyamadığı sonucuna varılmıştır.

Dizel motorlardaki yanma esnasında ortaya çıkan H_2SO_4 , yanma odasından piston segmanları ile silindir cidarları arasından kartere sızmaktadır. Bunun yanında, silindir cidarlarında ince bir film tabakası olarak bulunan yağ da yanma odasında meydana gelen reaksiyonlardan etkilenmekte ve yanmış gazların bir kısmının üzerine yapışması ile birlikte pistonun AÖN'ya hareketi esnasında kartere sıyrılabilir. Ayrıca, biyogazın sahip olduğu düşük yanma sıcaklığı nedeniyle kartere kaçan bu gazların ve ihtiva ettikleri asit ve su buharının karter havalandırma sistemi aracılığı ile üst karter bölgesinden uzaklaştırılmadan yoğunlaşarak yağa karıştıkları ve bu sayede de yağda hızlı bir bozulmaya sebep oldukları düşünülmektedir.

Yatak malzemesine yönelik yapılan bu çalışma, Caterpillar Firması tarafından yapılan önceki saha çalışmaları (Caterpillar, 2015) ile kıyaslanmıştır. Önceki çalışma sonuçlarına ilişkin görsel veriler, Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Bu testlerde turbo yatakları (a) ve motor yağ soğutucularındaki (b) korozyon oluşumu gözlenmiştir.



(a) Caterpillar tarafından yapılan inceleme-Turboşarj yatağı (Cat., 2015).



(b) Caterpillar tarafından yapılan inceleme-Yağ soğutucusu (Cat., 2015).

Şekil 5.6 Saha çalışmalarından alınan neticeler.

Yatak ve yağ soğutucu eşanjörlerinde meydana gelen korozyonun benzer şekilde olduğu görülmüştür. Bu durumun ileriki dönemlerde hem yatakların değişmesine hem de yağ soğutucusunun değiştirilmesi ile sonuçlanacağı belirtilmektedir.

5.2 Titreşim testlerinin incelenmesi

Titreşim testleri TS ISO 8528-9 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Motorda meydana gelen titreşimler, öncelikle konvansiyonel dizel yakıtı ile sonrasında ise sırasıyla doğalgaz/dizel çift yakıtlı ve biyogaz/dizel çift yakıtlı olarak ölçülmüştür. Ölçümler neticesinde elde edilen veriler Origin 8.5 veri analiz programı kullanılarak incelenmiştir. Bu inceleme öncesinde mevcut titreşim verileri “Fast Fourier Transform” metoduyla frekans verisine çevrilmiştir. Çevrilen bu veriler motor yüküne bağlı olarak her yakıt için ayrı ayrı işlenerek sonuçlar tek bir grafikte bindirme yapılarak gösterilmiştir.

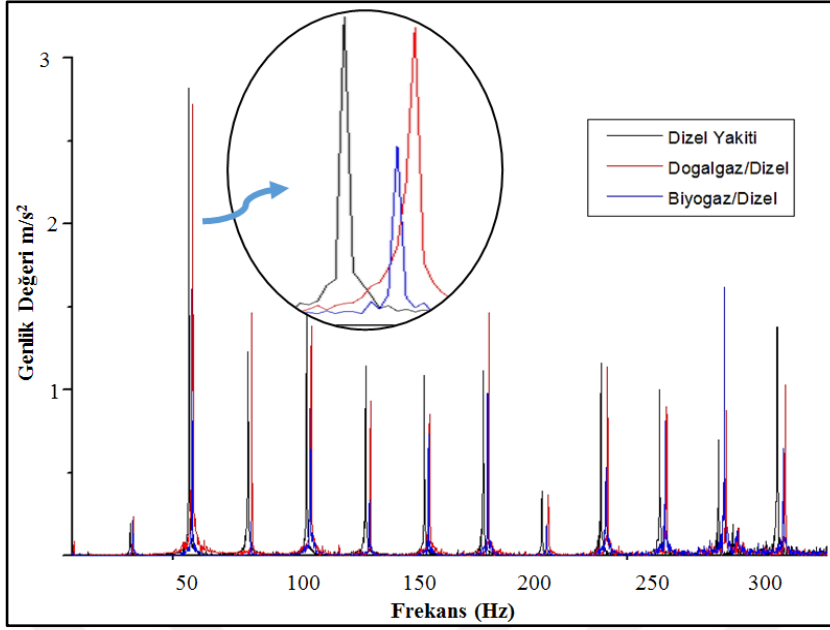
Bu yöntemde veriler işlenirken tekrarlanmayan sinyaller dikkate alınmamış, karmaşık sinyallerin içinden periyodik olanları belirlenip bileşenlerine ayrılmıştır. Farklı yapıda ve özellikte yakıtların motorda meydana getirdiği titreşimlerin test edilmesi amaçlandığından hangi eksenel vibrasyonların daha önemli olabileceği belirlenmiştir.

İçten yanmalı motorlar, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünü sağlayan makinelerdir. Dolayısıyla ısı enerjisinin açığa çıkmasıyla oluşan yüksek basınç kuvvetleri ve bu basınç kuvvetinin etkisiyle hareket eden parçaların atalet kuvvetleri motor bloğu üzerinde zorlama kuvvetleri oluşturmaktadır. Silindir içi gaz basınç kuvvetlerinin etkileri ise daha çok yatay eksenli olarak gerçekleşmektedir. Özellikle yüksek sıkıştırma oranına sahip motorlarda bu etki diğer motor parçalarından kaynaklı titreşimlerden daha baskın olabilmektedir (Öztürk, E., 2011). Motor bloğunda meydana gelen yatay doğrultudaki titreşimlerin ve gürültünün önemli nedenlerinden birisi de piston çarpmasıdır. Piston ile silindir yüzeyi arasında oldukça küçük bir boşluk bulunmaktadır. Bu boşluk oldukça küçük olmasına rağmen pistonu ikinci bir hareket doğrultusu kazandırabilmesi için yeterlidir. Ayrıca bu boşluktan dolayı piston pim ekseninde küçük bir miktar dönme hareketi de gerçekleştirebilmektedir. Özellikle iş zamanında yüksek basınçlı gazların etkisi ile piston silindir yüzeyine çarpar. Bu durum silindir yüzeyine yatay doğrultuda bir kuvvetin etki etmesine ve gürültü oluşumuna neden olur (Solmaz, H., 2014).

Motorda kullanılan soğutma sıvısı ve yağlama yağı, silindir içerisine alınan hava ve dışarı atılan egzoz gazı gibi akışkanlar da belirli bir miktar atalet kuvveti meydana getirmektedirler. Karterde bulunan ve sürekli çalkalanan motor yağı, soğutma kanallarındaki soğutma sıvısının yön değiştirmesi ve çalkalanması, çarpma ile yağlamalı sistemlerde piston-krank-biyel mekanizmasına çarpan yağ, motor titreşimlerine etki etmektedir (Öztürk, E., 2011; Solmaz, H., 2014). Bu anlamda pistonun üst yüzeyinde meydana gelen yanma ve sonrasındaki piston silindir yüzey temaslarında, kullanılan yakıt ve yakıt karışımlarına bağlı olarak farklılık gösterebileceği değerlendirildiğinden yanal titreşimler önemli olarak tespit edilmiş ve incelemeye değer görülmüştür.

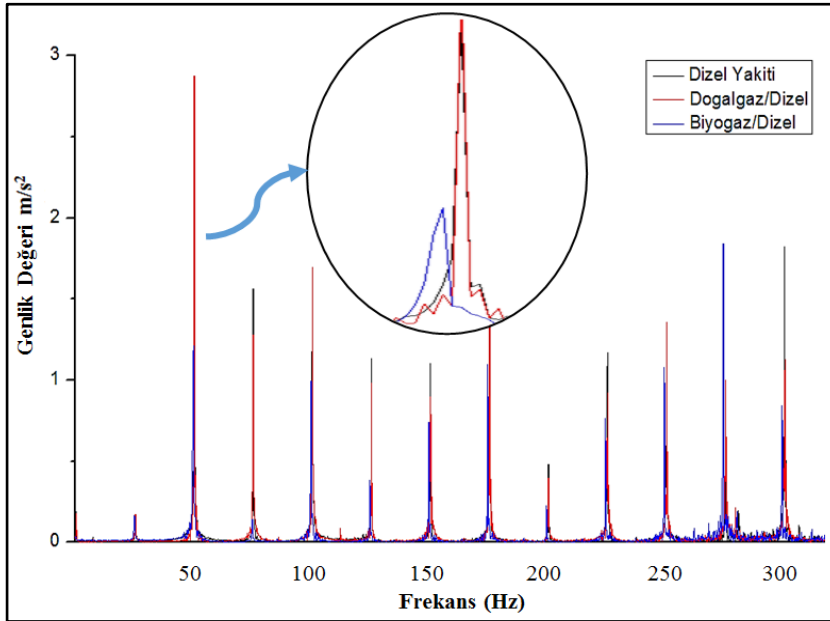
Deney motoru, testler esnasında $1500 \pm 2 \text{ min}^{-1}$ sabit devirde çalıştırılmıştır. Dolayısıyla sabit devir testlerinde krank mili kaynaklı motorun temel frekansı 25 hertz olarak hesaplanmıştır. Motorun diğer hareketli parçalarının çalışma esnasında meydana getirdikleri frekanslar da dikkate alınmıştır. Su pompası, yağ pompası, besleme pompası, dizel yakıt pompası, kam mili ve zaman ayar dişlisinin dönme hareketlerine ve devir sayılarına bağlı olarak ölçülen titreşim değerlerinde yüksek frekanslar yaydıkları tespit edilmiştir. Temel frekans dönüşüm metodu olan Fourier Dönüşüm metodu, matematiksel bir fonksiyona dayanır ve her bir veri için ayrı ayrı integrali hesaplanır. Hesaplamaların uzun süreli ele alınması durumunda hata payı büyüyerek frekans değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle 300 Hz frekansın üzerindeki değerler inceleme dışı bırakılmıştır. Tek yakıtlı dizel çalışma koşulu, doğalgaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulu ve biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşullarındaki titreşime bağlı frekans değerlendirmeleri her bir yük aralığı için ayrı ayrı grafiklerle gösterilmiştir. Burada yapılan incelemelerde, motorun genelinde meydana gelen farklı frekanslardaki değişimler gözlenmekle birlikte ana inceleme olarak piston hareketleri üzerinde durulmuştur. 25 Hz frekansla çalışan deney motorunda pistonların frekansı 50 Hz olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle 50 Hz frekansındaki değişimler, grafiklerde büyütülerek gösterilmiştir. Pistonların özellikle farklı yakıt ve yakıt karışımlarında sergilediği büyüklükler kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamada ise piston üzerine gelen dik kuvvetler yerine pistonun silindir içerisinde hareketini gerçekleştirirken, temas ettiği dayanma yüzeyleri dikkate alınmıştır. Bu piston silindir teması motordaki yanal titreşimlerin en önemli kaynağı olarak görülmektedir. Üç farklı yakıt tipine bağlı olarak oluşturulan grafikler, Şekil 5.7-11’de gösterilmiştir.

5 kW yük altında tüm yakıt sistemlerine göre yapılan titreşim testlerinde motor devri 1500 min^{-1} de sabit olduğundan frekans ve genliğinde önemli bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.7). Ancak pistonların dayanma yüzeylerine teması sebebiyle oluşan yanal titreşim değerlerindeki büyüklüklerin yakıtlara göre farklılık sergilediği görülmektedir. Dizel yakıtlı normal çalışma koşulunda 50 Hz frekansında $2,806 \text{ m/s}^2$ bir genlik söz konusu iken doğalgaz/dizel çift yakıtında bu genlik değeri $2,719 \text{ m/s}^2$ olarak ölçülmüştür. Biyogaz/dizel çift yakıtında ise bu değer $1,602 \text{ m/s}^2$ olduğu görülmüştür.



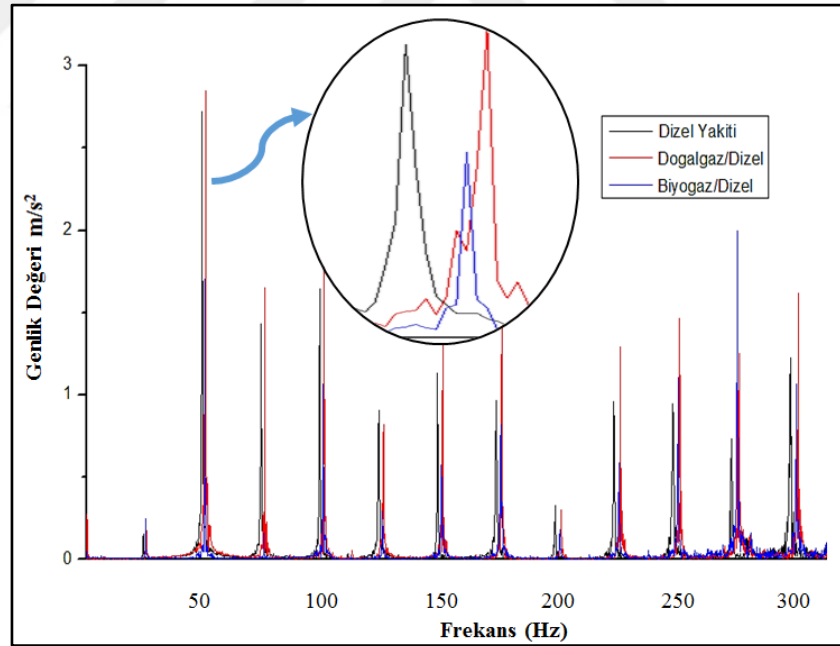
Şekil 5.7 5 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.

Piston tepesine etki eden sıcaklığı ve basıncı yüksek dolgu, pistonun yanıl yüzeylere yaptığı yaslanma kuvvetini artırmaktadır. Dolayısıyla aynı frekans değerinde farklı genlikler elde edilmektedir. Tek yakıtlı dizel ile doğalgaz/dizel çift yakıtlı sistemlerinde elde edilen piston genlik değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır. Biyogaz kullanımı durumunda ise bu değer, % 43 oranında azalmıştır.



Şekil 5.8 10 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.

Motor yükünün artışına bağlı olarak 10 kW yükte referans dizel yakıtın $3,034 \text{ m/s}^2$ genlik değerine çıktığı görülmektedir (Şekil 5.8). Doğalgazlı çift yakıt çalışma koşulunda ise bu değer $3,383 \text{ m/s}^2$ değerine çıktığı tespit edilmiştir. Aynı frekans değerinde biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışmada ise genlik değeri $1,195 \text{ m/s}^2$ olarak kaydedilmiştir. Bir önceki yük koşulunda olduğu gibi dizel ve doğalgazlı çift yakıt değerleri birbirine benzer çıkmıştır. Biyogazın ana yakıt olarak kullanıldığı deneydeki genlik miktarı, dizel yakıtla kıyasla % 60,61, doğalgazın ana yakıt olarak kullanıldığı deneye kıyasla ise % 64,68 oranında daha düşük çıkmıştır. Özellikle doğalgazlı çalışmada motorun her frekansında daha titreşimli çalıştığı görülmektedir. Bunun sebebinin ise doğalgazın meydana getirdiği vuruntulu çalışmadan kaynaklandığı bilinmektedir (Nwafor, 2002; Soylu, 2005; Saikaly et al., 2010). Yanma esnasında motorda meydana gelen basınç artışının, motorun tüm frekanslarındaki çalışmaları etkilediği görülmektedir. Yanma süresince meydana gelen basınç dalgasının kurs boyunca oldukça etkili olduğu bilinmektedir.

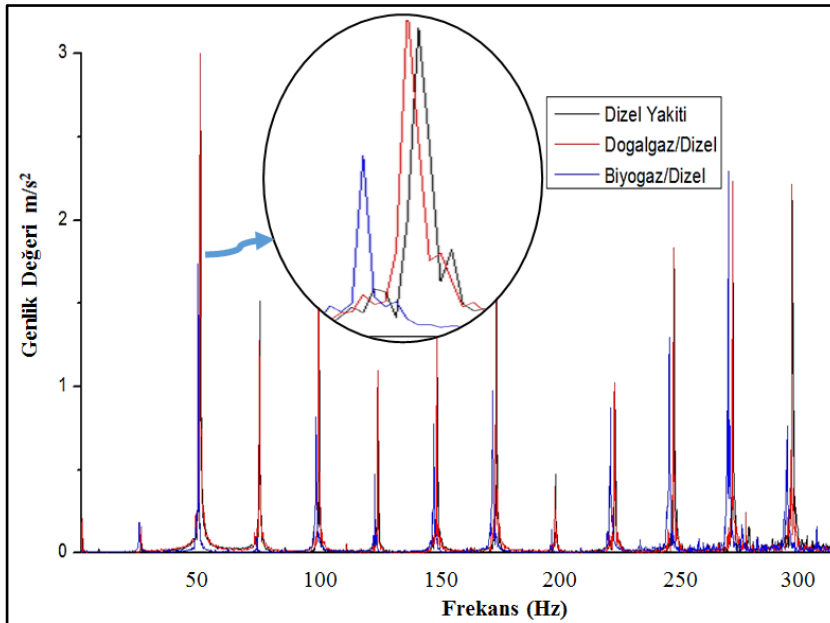


Şekil 5.9 15 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.

15 kW yük değerine gelindiğinde dizel tek yakıtlı çalışmada, genlik değeri $2,734 \text{ m/s}^2$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.9). Doğalgaz/dizel çift yakıt koşulunda, aynı frekanstaki genlik değeri $2,795 \text{ m/s}^2$ olarak gerçekleşmiştir. Hem dizel tek yakıt hem de doğalgaz/dizel çift yakıt testlerinde, 15 kW yükteki genlik

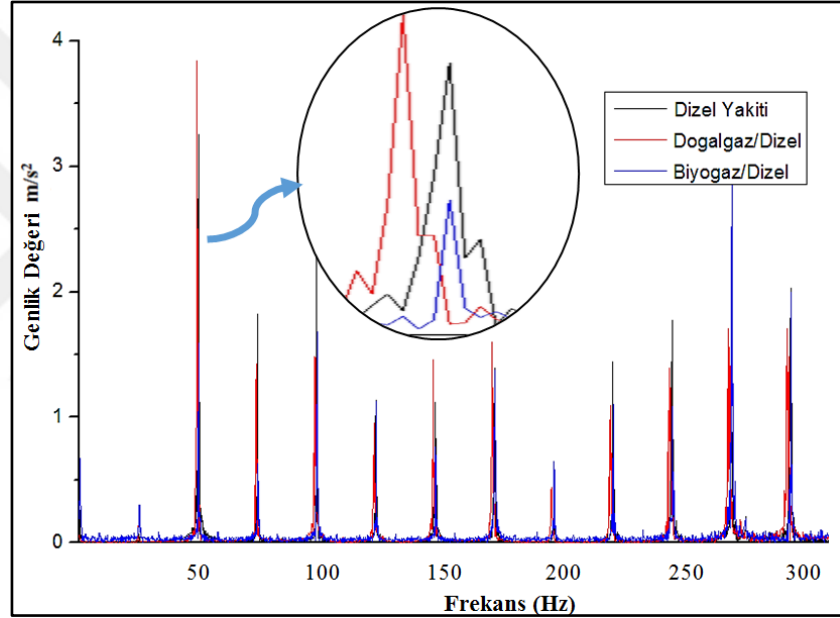
değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda ise bu değer $1,708 \text{ m/s}^2$ olarak bulunmuştur. Biyogazın kullanıldığı bu testte elde edilen genlik değeri dizel yakıtı oranla % 37,53, doğalgaz/dizel çift yakıtlısına kıyasla ise % 38,89 daha düşük olduğu görülmektedir. Biyogaz çift yakıtlısında motor çalışma şartlarında önemli bir değişim gözlenmez iken doğalgazın 15 kW yük altında 10 kW'a kıyasla daha sarsıntısız çalıştığı görülmektedir.

Dördüncü basamak olan 20 kW'lık yük altında ise dizel yakıtı genlik değeri $3,014 \text{ m/s}^2$, doğalgazın genlik değeri ise $3,162 \text{ m/s}^2$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.10). Hem dizel yakıtının hem de doğalgaz çift yakıtlısının, önceki yüklerde olduğu gibi benzer genlik karakteristiklerini bu yük altında da koruduğu görülmektedir. Bununla birlikte biyogazın aynı frekanstaki genlik değeri de, $1,745 \text{ m/s}^2$ olarak tespit edilmiştir. 20 kW yükte biyogazlı çift yakıt koşulunun dizel tek yakıtlı ve doğalgaz çift yakıtı ile meydana getirdiği farklılıklar ise sırasıyla % 42,10 ve % 44,81 olarak belirlenmiştir. Yük artışına bağlı olarak sayısal bazlı genlik değerlerinde değişim meydana gelmekle birlikte genlik karakterlerinin benzerliğini koruduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 5.10 20 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.

Tam yük testlerine gelindiğinde; referans dizel tek yakıtında aynı frekans değerindeki titreşim genliği $3,275 \text{ m/s}^2$ olarak tespit edilirken, doğalgaz/dizel çift yakıtlısında bu değer $3,848 \text{ m/s}^2$ olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.11). Tam yük altında çift yakıtlı doğalgaz ile dizel arasında fark diğer yüklere göre artmıştır. 25 kW yük altında bu iki yakıt arasındaki fark % 17,5 olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda, doğalgazın ana yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtta, tam yük altında vuruntu meydana getirdiği değerlendirilmektedir. Tam yükte biyogaz çift yakıtlısının 50 Hz deki meydana getirdiği titreşime bağlı genlik $1,6 \text{ m/s}^2$ olarak kaydedilmiştir. Bu değer dizele göre % 51,14 doğalgaza göre de % 58,42 düşmüştür.



Şekil 5.11 25 kW yük altında üç yakıtın titreşim karşılaştırması.

Motorun tüm yük karakteristiklerinde biyogaz/dizel çift yakıtlısının yanma ile meydana gelen titreşim genliği, dizel ve doğalgazla elde edilenlerden daha küçük olmuştur. Doğalgaz çift yakıtlısında ise 5 kW yük haricindeki tüm motor yüklerinde titreşim genliklerinin referans yakıtı kıyasla az bir farkla da olsa büyük olduğu görülmektedir.

Titreşim genliğindeki bu azalmanın sebebinin biyogazın içeriğinde bulunan % 40 oranındaki CO_2 gazının etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. İnört özelliğe sahip CO_2 gazının hiçbir tepkimeye girmemesi buna karşılık yanma

odasına alınan dolgunun hacimsel verimini düşürmesinin temel etken olduğu düşünülmektedir. Bu etki tüm yük koşulları altında benzer şekilde gerçekleşmiştir. Dizel yakıtta meydana gelen piston titreşimleri referans olarak alındığında doğalgazın artan yüke bağlı olarak meydana getirdiği titreşimlerinin de yükseldiği görülmektedir. Özellikle tam yük altında bu değerin oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. Yanma odası içerisinde artan sıcaklığa bağlı olarak hem pilot yakıtın hem de ana yakıt olarak kullanılan doğalgazın tutuşma gecikmelerinin kısılması, hatta yanma odasının farklı bölgelerinde her iki yakıtın birbirinden bağımsız alev çekirdekleri oluşturması dolayısıyla birbirine ters yönde oluşabilecek alev cephelerinin çarpışması neticesinde kontrolsüz ve daha büyük değerlerde basınç artışı meydana gelerek pistonun üzerine etki ettiği değerlendirilmektedir. Bu etki neticesinde de piston/silindir büyük dayanma yüzeylerinde daha şiddetli çarpma hareketi ortaya çıkmaktadır. Normal şartlarda doğalgazın bir dizel motorunda tek yakıtlı olarak kullanımı durumunda vuruntunun ve kontrolsüz yanmanın önüne geçilebilmesi için sıkıştırma oranı düşürülmektedir. Çift yakıtlı bu çalışmada, sıkıştırma oranının sabit tutulması nedeniyle yüksek yüklerde bu etki ile karşılaşmıştır.

Tam yük altında ortaya çıkardığı titreşimler nedeniyle, biyogazın yanma sürecinde oldukça stabil ve sorunsuz görev yaptığı gözlenmiştir. Yukarıda da ifade edildiği üzere CO₂ gazının varlığına ilave olarak biyogazın sahip olduğu yüksek metan sayısı vuruntu direncini artırmıştır. Silindir içerisine alınan dolgunun içeriğinde bulunan hava ve CO₂ gazı, gaz ve/veya sıvı pilot yakıt molekülleri arasına girerek alevin yayılma hızını düşürmekle birlikte hacimsel genişlemenin başladığı sıkıştırma sonu iş zamanı başlangıcında hacim artışına bağlı olarak sıcaklığın da düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca yanma odası içerisine emme subabı aracılığı ile alınan dolgu maddesinin ısı sığalarının da dikkate alınmasının gerektiği değerlendirilmektedir. Isı sığası veya ısı kapasitesi, bir maddenin sıcaklığını 1 °C değiştirmek için gerekli olan ısı miktarını ifade etmektedir. Silindir içerisine alınan temel hava bileşenleri olan azot gazının ısı sığası 29,124 J/mol.K, O₂'nin ısı sığası 29,378 J/mol.K, metan gazının 35,690 J/mol.K ve CO₂ gazının ise 37,135 J/mol.K'dir. Dolayısıyla yanma odası içerisinde bulunan karbondioksitin sadece hacimsel işgal ettiği alanın dışında,

diğer gazlara oranla sahip olduğu daha yüksek ısı kapasitesi sebebiyle de, yanma odası sıcaklığının düşmesinde etkili olduğu görülmektedir.

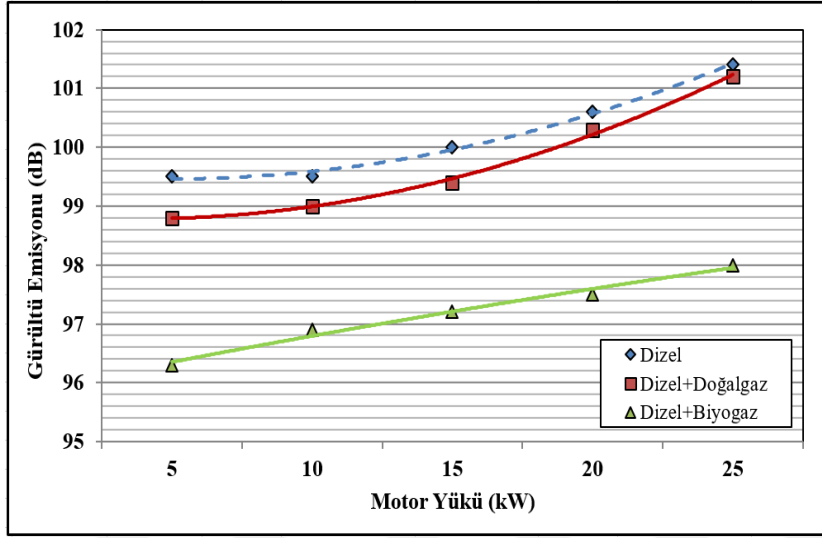
Her üç yakıt için ölçülen/hesaplanan bu veriler, gürültü emisyonu ile kıyaslandığında birbiri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Titreşim verilerinde ortaya çıkan bu neticelerin gürültü ve ses ölçümleri ile benzer olduğu tespit edilmiştir. Ancak ses seviyesindeki değişimlerde yanmanın başlatıcısı rolünde bulunan pilot yakıtın varlığı ve miktarının daha baskın olduğu değerlendirilmektedir. Temel olarak yanmayı etkileyen bu hususlar genelde motor titreşimi üzerindeki farklılıkların sebebi olarak görülmektedir.

Motorun titreşimleri ve yakıtlara göre değişimi, motorun kullanım ömründe ve bakım fasıllarının değişmesine de etki etmektedir. Özellikle piston, biyel, krank mili gibi temel motor parçalarında meydana gelen standart dışı titreşimler çok yüksek bakım ve onarım maliyetleri ile sonuçlanabilmektedir. Titreşim analizlerinin belli aralıklarla ve kontrol mahiyetinde yapılması, fiziksel olarak algılanacak sorunların ortaya çıkmadan çok öncesinde tespit edilmesini sağlamaktadır. Gerek sabit motorlar, gerekse taşıt motorlarındaki titreşimler motorun kendisini etkilemenin dışında diğer çevre elemanlarına da zarar verebilmektedir. Motora bağlantısı bulunan güç aktarma organlarının ve motor takozları aracılığıyla bağlandığı taşıt şasesinin etkilenmesi söz konusu olabilmektedir. Jeneratör motorlarında ise motora bağlanan alternatör ve ekipmanlar ile jeneratör kabini ve kabin bağlantıları, bu standart dışı titreşimlerden etkilenmektedir. Dolayısıyla farklı yakıtların kullanımı söz konusu olduğunda, yeni titreşim özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkacak ihtiyaca yönelik yeni takozların seçilmesi, sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

5.3 Gürültü emisyonu ve etkileri

Gürültü miktarının ölçülmesi maksadıyla, deney motoru çalışma sıcaklığına ulaşıncaya kadar çalıştırılmıştır. Sonrasında hem dizel tek yakıtlı olarak, hem de doğalgaz/dizel ve biyogaz/dizel çift yakıtlarının tüm yük kademelerinde testler tekrarlanarak kayıt altına alınmıştır. Bu testler yapılırken motordan kaynaklı sesleri absorbe edebilecek herhangi bir ekipman bulundurulmamıştır. Bu nedenle

jeneratör motorunun bulunduğu jeneratör ünitesinden, ses yalıtım maddeleri çıkarılmıştır. Elde edilen gürültü verileri Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Gürültü emisyonunun motor yüküne bağlı olarak değişimi.

Değişken motor yükleri altında motor gürültü seviyeleri incelendiğinde, dizel tek yakıtlı ve doğalgaz/dizel çift yakıtlısında gürültü oluşumunun yüksek seviyede olduğu buna karşılık biyogaz/dizel çift yakıtlısında ise daha düşük olduğu gözlenmiştir. Dizel tek yakıtlı çalışma koşulunda, 5 kW yük altında 99,5 dB olarak ölçülen motor sesi motor yükünün artması ile birlikte artış göstermektedir. Bu artışın grafik değerleri incelendiğinde, yukarı yönlü olarak devam ettiği görülmektedir. 25 kW motor tam yükünde bu gürültü değeri 101,4 dB değerine ulaşmıştır.

Doğalgaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda ise, 5 kW yük altında 98,8 dB olarak ölçülmüştür. Doğalgazlı bu çift yakıt sistemi de dizel tek yakıt sistemine çok benzer bir eğilim göstermektedir. 25 kW tam yükte bu değerin, 101,2 dB’e ulaştığı görülmüştür. Yüke bağlı olarak oluşan farklılıklar % 0,7 ile % 0,2 aralığında gerçekleşmiştir. Buradan da anlaşılabileceği üzere, dizel ve doğalgazın kullanımı neticesinde çevreye yayılan gürültü miktarında kayda değer bir fark görülememiştir.

Biyogaz/dizel çift yakıtlısı ile ilgili ölçüm sonuçları incelendiğinde 5 kW yük altında 96,3 dB olduğu görülmektedir. 10 kW’da 96,9 dB, 15 kW’da 97,2 dB,

20 kW’da 97,5 dB ve tam yük altında (25 kW) 98 dB olarak ölçülmüştür. Bu veriler ışığında, doğalgazın aksine biyogazın motorda kullanılması ile gürültü emisyonunun azaltıldığı görülmüştür. 5 kW yükte dizele kıyasla ses miktarı % 3,22 oranında azaltılırken, tam yükte gürültü seviyesindeki düşüş % 3,35 olarak hesaplanmıştır. Biyogazın yüke bağlı değişimi incelendiğinde dizel ve doğalgazdan farklı olarak daha yatay bir görünüm sergilemektedir.

Bir önceki bölümde belirtilen biyogazın titreşim verileri ile gürültü emisyonları kıyaslandığında birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir. Titreşim genliğinin azalması neticesinde yanmanın daha yumuşak olduğu dolayısıyla piston çarpmasının daha düşük atalette gerçekleşmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Aynı zamanda metan sayısının yüksek olması sebebiyle vuruntu direncinin yükselmesi ve alevin yayılma hızının düşmesi neticesinde motordan çevreye yayılan yanma kaynaklı ses miktarının düştüğü değerlendirilmektedir. Yakıta bağlı olarak değişen atalet kuvvetleri motordaki tüm hareketli parçalardan kaynaklı titreşimi dolayısıyla da gürültü yayılımı etkilediği kıymetlendirilmektedir.

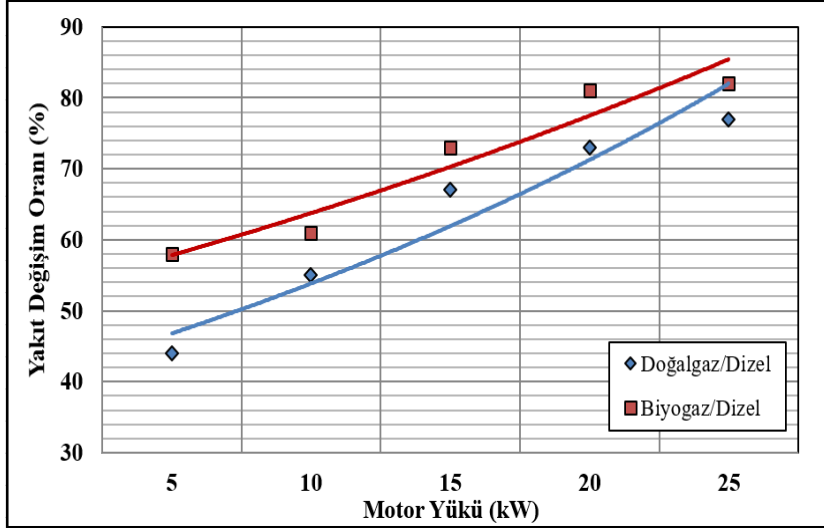
Ses miktarında meydana gelen düşüğe bağlı olarak özellikle jeneratörler için kullanılan yalıtım malzemelerinde tasarruf sağlanabileceği, maliyetlerin düşeceği ve/veya motorların ilave tedbir ve modifikasyonlar sayesinde çok daha sessiz çalışabileceğinin mümkün olduğu düşünülmektedir.

5.4 Yakıt değişim oranı

Çift yakıtlı motorlarda yakıt değişim oranı, kullanılan pilot yakıt ile ana yakıt arasındaki yüzdesel değişimi ifade etmektedir. Bu değişim oranı, gaz veya sıvı tüm çift yakıt sistemlerinde kullanılan ortak bir ifadedir. Değişim oranı deney esnasında eşzamanlı olarak kullanılan yakıtların tüketim değerleri sayesinde hesaplanmaktadır. Mevcut deneyde ana yakıt olarak gaz yakıt, pilot yakıt olarak sıvı yakıt kullanıldığından kütleli tüketim değerleri hesaplanmıştır (Şekil 5.13).

Çift yakıtlı testlerde 5 kW yük altında doğalgaz/dizel yakıt tüketim oranı % 44 olur iken, aynı yükte biyogazda bu değer % 58’e çıkmıştır. Diğer yük kademelerinde doğalgaz/dizel dönüşüm oranları sırasıyla; 10 kW’da % 55,

15 kW’da % 67, 20 kW’da % 73 ve 25 kW yük altında ise % 77 oranında bir yakıt değişim oranı elde edilmiştir. Motor yükünün artışına bağlı olarak değişim oranlarının da yükseldiği görülmektedir.



Şekil 5.13 Çift yakıt sistemlerine bağlı olarak yakıt değişim oranları.

Biyogaz/dizel yakıt değişim oranı incelendiğinde de 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW ve 25 kW yüklerde sırasıyla % 58, % 61, % 73, % 81 ve % 82 değerlerine ulaşılmıştır. Eğrinin karakteristiği değerlendirildiğinde, biyogazda da doğalgaza benzer bir hareketlerin olduğu görülmektedir.

Doğalgaz ile biyogaz aralığındaki yakıt değişim oranları kıyaslandığında ise tüm yük kademelerinde biyogaz/dizel değişim oranı doğalgaz/dizel değişim oranından daha yüksektir. Ayrıca artan yüklere bağlı olarak her iki çift yakıt sisteminin değişim oranları artmaktadır. Düşük yük kademelerinde doğalgaz ve biyogazlı sistemler arasındaki fark % 31,82 olarak gerçekleşirken yük artışına bağlı olarak bu değer % 6,49’a kadar düştüğü görülmüştür. Düşük yüklerdeki farkın, motorun daha verimsiz bir yanmanın gerçekleşmesine bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Doğalgazın değişim oranının biyogaza kıyasla daha düşük değerlerde seyretmesinin sebebinin, doğalgazın sahip olduğu ısı değeri ve daha düşük metan sayısına bağlı olarak belli bir değişim oranının üzerine çıkılması durumunda silindir içerisinde meydana gelen vuruntudan kaynaklandığı düşünülmektedir. Değişim oranının tespitinde motor titreşimlerinin rms değerleri eş zamanlı takibi ile tespit edilmektedir. Vuruntunun ve/veya düzensiz çalışmanın

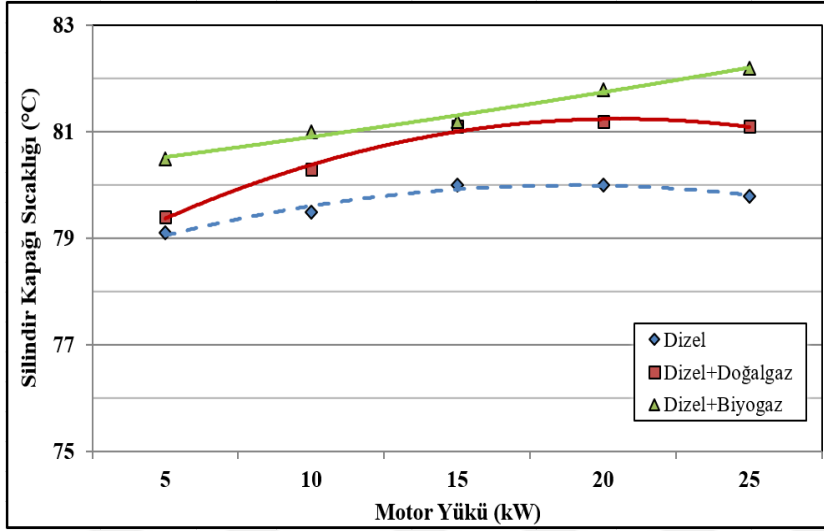
başladığı pozisyona bağlı olarak yakıt tüketimleri sabitlenmiştir. Dolayısıyla doğalgazın silindir içerisinde optimum olarak çalıştığı yakıt değişim oranları, biyogazlı çift yakıttan daha düşük olduğu görülmüştür. Biyogazın bu aşamada yüksek değişim oranlarına çıkabilmesinin en büyük sebepleri içerisinde bulunan CO₂'nin yanmayı yavaşlatıcı etkisinden ve vurutuya karşı biyogazın sahip olduğu yüksek metan sayısından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu sayede motorda vurutuya sebep olmadan daha yüksek miktarda biyogaz kullanılabilir iken pilot dizel yakıtının da daha ekonomik kullanımı söz konusu olmaktadır. Yakıt değişim oranlarında farklı ayarlamalar ile % 90'dan daha yüksek değerlere ulaşılabilmesi mümkündür. Ancak motor yakıt sisteminin sahip olduğu enjektörler ve direkt yüksek basınç ve sıcaklığa maruz kalan enjektör memelerinde ciddi tahribatlar meydana geldiği/gelebileceği literatürde de ifade edilmektedir (Yoon, S.H., Lee, C.S., 2011). Özellikle enjektör memelerinin yeterince pilot yakıt ile soğutulamaması neticesinde yanmaya ve deliklerin tıkanmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada yapılan testlerin en büyük amaçlarından birisi de, mevcut dizel jeneratörlerin minimum maliyetler ile biyogaz kullanımına dönüşümünü sağlayabilmektir. İfade edilen minimum maliyetler içerisinde hem ekipman/parça ömrünün uzatılması hem de dönüşüm ve modifikasyon giderlerinin en alt seviyede tutulabilmesini kapsamaktadır. Bu nedenle yakıt tüketim maliyetleri ile parça maliyetleri arasındaki dengenin iyi kurulması gerekmektedir.

5.5 Motor parçalarının termal olarak incelenmesi

Silindir bloğu, silindir kapağı, emme ve egzoz manifoldu gibi ana motor parçalarının yakıtlara bağlı olarak sıcaklık değişimleri, FLIR-E40 marka bir termal kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Her parçanın farklı yüklere bağlı olası değişimleri de görsel olarak kayıt altına alınmıştır. Söz konusu görsel kayıtlar EK-1'de gösterilmektedir. Burada, kapalı bir kabin içerisinde çalışan jeneratörden çevreye yayılması muhtemel ısının, yakıt ve sistem farklılıklarına bağlı değişimi belirlenmeye çalışılmıştır. Silindir kapağındaki yüke bağ sıcaklık değişimleri Şekil 5.14'de gösterilmektedir.

Dizel tek yakıtlı çalışma koşulunda, silindir kapağı sıcaklığının tüm motor yüklerinde 79-80 °C aralığında sabit kaldığı görülmektedir. Doğalgaz/dizel çift

yakıt çalışma koşulunda kapak sıcaklığının dizele çok yakın olduğu görülmekle birlikte 79,5-81,2 °C aralığında değiştiği tespit edilmiştir.



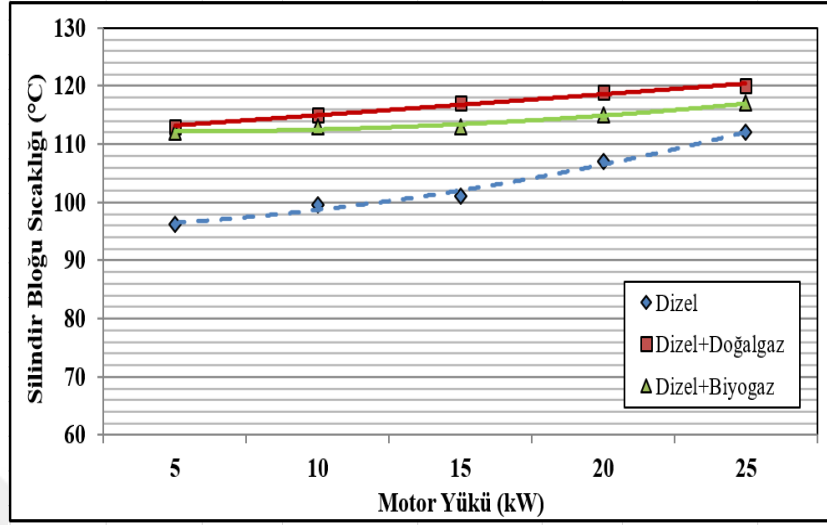
Şekil 5.14 Silindir kapağı sıcaklığının yüke ve yakıtı göre değişimi.

Biyogaz/dizel çift yakıtlısında ise değer 80,5-82,5 °C aralığında kaydedilmiştir. Dizel ile kıyaslandığında, biyogazda 2-2,5 °C sıcaklık artışının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu artışın biyogazın yanma süresinin daha uzun olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Alevin daha uzun süre boyunca yanma odası cidarlarına temas etmesine bağlı olarak yanma odasının üst kısmını meydana getiren silindir kapağının da alevle teması artmaktadır. CO₂ ihtiva eden biyogazın yanma esnasında daha düşük tepe sıcaklığı elde edilmesine karşılık, mevcut ısının daha uzun süre yanma odasında dolaşması parça sıcaklıklarını düşük miktarda etkilediği görülmüştür.

Silindir bloğundan çevreye yayılan sıcaklık değerlerinin yüke bağlı değişimi, Şekil 5.15’de gösterilmektedir. Motor bloğunun da silindir kapağına benzer özellikler sergilediği, ancak alevin temas yüzey alanının genişleyen hacim nedeniyle artmasına bağlı olarak daha yüksek değerler ölçüldüğü görülmektedir.

5 kW yükte dizel yakıtında, 96,2 °C olarak ölçülen blok sıcaklık değeri motor yükünün artışıyla birlikte artmaktadır. 10 kW yükte 99,6 °C, 15 kW’da 101 °C, 20 kW yükte 107 °C ve 25 kW tam yükte iken 112 °C sıcaklık değeri

kaydedilmiştir. Doğalgaz/dizel çift yakıtlısında da ölçülen değerler motor yüküne bağlı olarak artış göstermiş ancak artış eğilimi daha yatay olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.15 Silindir bloğunun sıcaklık değişimi.

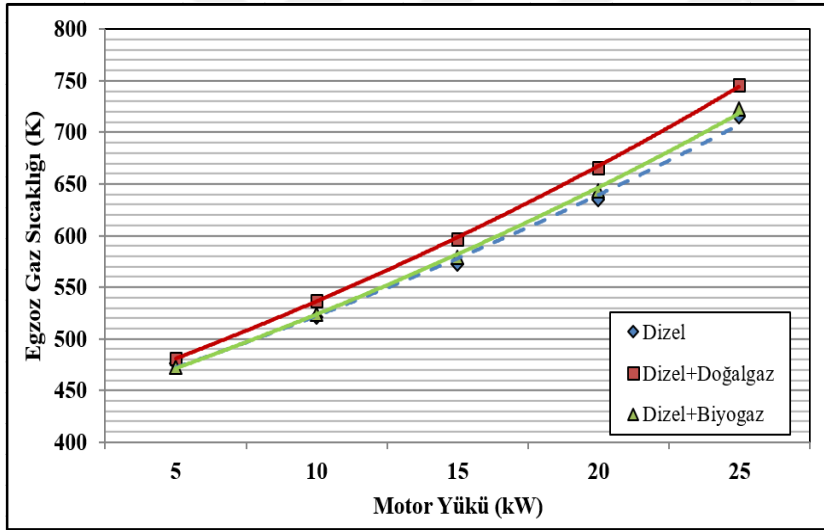
Buna göre, doğalgaz/dizel çift yakıtlısından blok sıcaklık değerlerinin 113 °C ile 120 °C arasında yüke bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Benzer olarak biyogaz/dizel çift yakıtlısında da, bu eğilim görülmektedir. Biyogazlı çift yakıtta 5 kW yükte 113 °C iken, 25 kW yüke çıkıldığında 116 °C'ye çıkmıştır. Yakıtların yanmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla yüke bağlı sıcaklık değişimlerinin daha az olduğu görülmektedir. Beş kademeli yük artışında dizel yakıtındaki sıcaklık değişim oranı % 16,42 olmasına karşılık, doğalgaz/dizel çift yakıtlısında % 6,19 olurken biyogaz/dizel çift yakıtlısında % 2,66 olarak gerçekleşmiştir.

Tek ve çift yakıtlı sistemlerin emme manifoldu sıcaklıkları incelendiğinde yükün artışına bağlı olarak önemli bir değişimin söz konusu olmadığı, tespit edilmiştir. Dizel tek yakıtlı sistemde 5 kW yük altında 29,7 °C olarak ölçülürken tam yük altında bu değer 30 °C olarak kaydedilmiştir. Doğalgaz/dizel çift yakıt çalışma koşulunda 29-30 °C sıcaklık aralığının olduğu ve son olarak da biyogaz/dizel çift yakıtlısında 27-28 °C olduğu tespit edilmiştir. Yakıt ve sistem değişiminin emme manifoldu sıcaklığı üzerine etkisi gözlenmemiştir. Bu sayede emme sistemindeki gaz karışımının da sıcaklığa bağlı olarak genişlemesinin ve hacimsel verim düşüşünün önüne geçilmektedir.

5.6 Egzoz gaz sıcaklığının incelenmesi

Çalışmada, egzoz gaz sıcaklığı egzoz borusuna yerleştirilen bir adet termokupl ile kaydedilmiştir. Üç farklı yakıt sistemine uygun olarak kaydedilen bu gaz sıcaklık değerleri Şekil 5.16'da gösterilmektedir. Egzoz gaz sıcaklıklarından yanma odasında meydana gelen reaksiyonlar hakkında ve yüksek sıcaklığa maruz kalan motor parçalarına yönelik değerlendirmelerin yapılmasında faydalanılmaktadır.

Yapılan çalışma neticesinde elde edilen veriler ile literatürde elde edilen sonuçlar da kıyaslandığında benzer olduğu teyit edilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıklarındaki artışa karşılık soğutma suyu ve yağ sıcaklıklarında önemli değişikliklerin olmadığı da kaydedilmiştir. Bu artışların aynı zamanda temel motor parçalarına da kayda değer bir etkisi bulunmamıştır.



Şekil 5.16 Egzoz gaz sıcaklığının motor yüküne bağlı değişimi.

Dizel tek yakıtlı sistemde; 5 kW'dan 25 kW'a kadar artan yüklerde egzoz gaz sıcaklıkları sırasıyla 476 K, 521 K, 572 K, 635 K ve 715 K olarak kaydedilmiştir. Doğalgaz çift yakıtlı sistemde ise, bu değerler sırası ile 481 K, 537 K, 597 K, 666 K ve 746 K olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda dizeldeki sıcaklık verilerine çok benzer sonuçlar elde edilmiştir. 5 kW'da 473 K, 10 kW'da 524 K, 15 kW yük altında 579 K, 20 kW yük altında 643 K ve son olarak 25 kW'da 723 K olmuştur. Bu ölçüm sonuçlarına

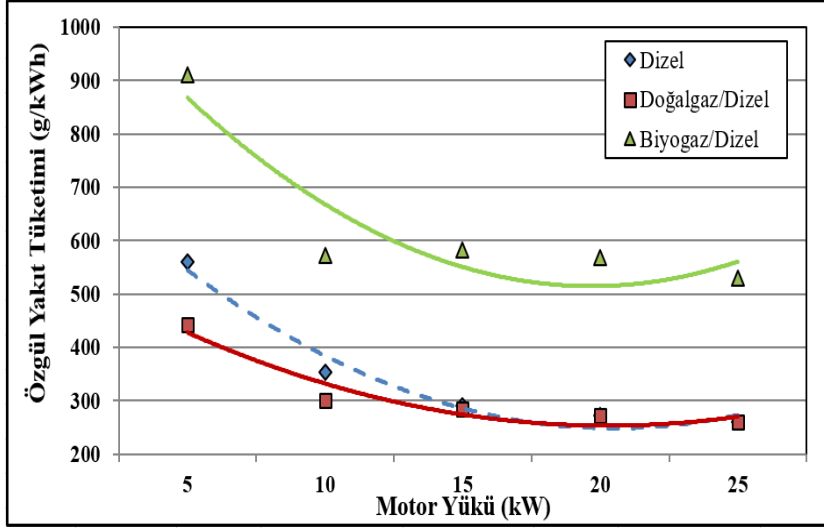
göre egzoz gaz sıcaklığı motorun tüm koşullarında doğalgaz/dizel çift yakıtlısında daha yüksek olarak kaydedilmiştir. Referans dizel yakıtı ile kıyaslandığında, tam yük altında doğalgaz çift yakıtlısı % 4,34 oranında daha yüksek egzoz gaz sıcaklığı meydana getirmiştir. Biyogaz çift yakıtlısında ise % 1,12 daha yüksek egzoz gaz sıcaklığına ulaşılmıştır. Tüm koşullarda en düşük gaz sıcaklığı referans dizel yakıtı ile elde edilmiştir. Bu durumun yakıtların sahip olduğu metan sayısı ve tutuşma sıcaklıkları ile bağlantılı olduğu değerlendirilmektedir. Deneyde kullanılan doğalgaz ve biyogazın metan sayıları sırasıyla, 130 ve 140 olarak ifade edilmiştir. Aynı şekilde doğalgaz ve biyogazın tutuşma sıcaklık değerleri, 650-700 °C dolaylarındadır. Dizel yakıtının kendi kendine tutuşma sıcaklığı ise, 210 °C ve üzeri sıcaklıklardadır (Kadayıfçılar ve Acar, 1992; Selim, 2004; Safgönül, vd., 2013; Anaonim 12, Aktacir, 2014;).

Doğalgaz ve biyogazın yüksek metan sayısı ve alevlenme sıcaklıkları nedeniyle, yanma süresi ve yanma süresi öncesindeki tutuşma gecikmesini etkilediği bilinmektedir. Özellikle çift yakıt sistemlere ilişkin olarak, iki farklı yakıtın iki farklı tutuşma gecikmesinin olduğu değerlendirildiğinde, bu sürenin uzamasının yanma reaksiyonlarının gecikmesinde önemli rol oynayacağı ifade edilmiştir. Buna ilave olarak, emme havasının içerisindeki gazın (doğalgaz veya biyogaz için) varlığı nedeniyle silindir içerisine alınan hava dolayısıyla O₂ miktarı azalmaktadır. Azalan O₂ miktarına bağlı olarak da, pilot yakıtın püskürtülmesinin ardından, yakıt molekülleri, tutuşabilmek için daha az miktarda O₂ ile reaksiyona gireceğinden pilot yakıtın tutuşma gecikmesinin normal süresinin üzerine çıkacağı öngörülmektedir. Buna bağlı olarak iş zamanında tamamlanamayan bir yanmanın meydana gelerek, art yanmanın büyük kısmının egzozu sarktığı sonucuna varılmıştır. Egzoz gaz sıcaklıklarındaki bu artışın motorun hacimsel verimini etkilediği bilinmektedir. Artan bu gaz sıcaklığı sayesinde silindir içerisinde kalan artık gaz kütlelerinin azalmasına ve buna bağlı olarak da içeri alınacak taze dolgu miktarının artışına sebep olabileceği değerlendirilmektedir.

5.7 Özgül yakıt ve özgül enerji tüketimlerinin incelenmesi

Deneylerde kullanılan yakıtların tüketim değerleri değişen motor yüküne bağlı olarak ölçülmüş ve ilgili yük koşuluna uygun olarak hesaplanmıştır. Bu

hesaplamalarda bulunan özgül yakıt tüketimleri gaz yakıtlar ve konvansiyonel dizel yakıt için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Ancak grafiksel ifadelerin daha anlaşılır olması maksadıyla kullanım koşuluna uygun olarak birleştirilerek verilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 5.17’de gösterilmektedir.

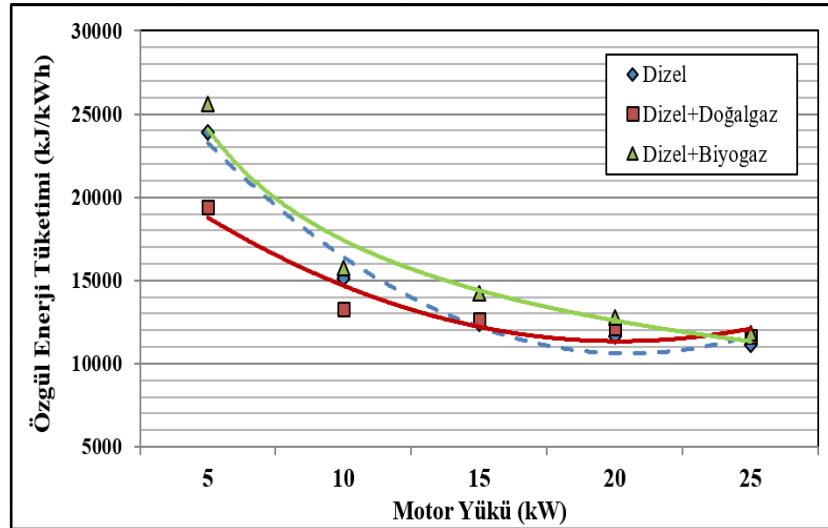


Şekil 5.17 Özgül yakıt tüketiminin motor yüküne bağlı olarak değişimi.

Dizel tek yakıtlı çalışmada özgül yakıt tüketim değerleri motor yüküne bağlı olarak sırasıyla 559,28 g/kWh, 353,88 g/kWh, 290,98 g/kWh, 272,58 g/kWh ve 260,77 g/kWh olarak belirlenmiştir. Motor yükündeki artışa bağlı özgül yakıt tüketiminin düştüğü görülmektedir. Doğalgaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda, dizel tek yakıtlısında elde edilen sonuçlara çok benzer verilere ulaşılmıştır. 5 kW yük altındaki özgül yakıt tüketimi 442,26 g/kWh olarak tespit edilmiştir. Yükün artışına bağlı olarak bu tüketim değeri düşüş göstermiştir. Tam yük altında ölçülen 259,46 g/kWh değeri dizel ile hemen hemen aynı çıkmıştır. Biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda yapılan hesaplamalarda elde edilen veriler ise; 5 kW yükte 910,39 g/kWh, 10 kW yükte 572,35 g/kWh, 15 kW’da 581,87 g/kWh, 20 kW’da 569,30 g/kWh ve tam yükte ise 528,86 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz çift yakıtlısında da diğer yakıtlara benzer olarak yükün artışı ile bu değer düşmektedir. Aşağı yönlü özgül yakıt tüketiminin değişim oranı dizelde % 47, doğalgaz/dizelde ve biyogaz/dizelde % 58 olarak gerçekleşmiştir. Doğalgaz/dizel çift yakıtlısı ve dizel tek yakıtlısına kıyasla biyogazın özgül yakıt tüketim değerlerinin artan motor yükü de dikkate alındığında % 60-% 100 oranında yükseldiği de görülmektedir. Düşük yük kademelerinde karışımın

kısmen fakir kalmasından, yanma odasında sıcaklığının diğer yük kademelerine kıyasla daha düşük olmasından ve pilot yakıt miktarının da diğer yük kademelerine göre düşük olmasına bağlı olarak tutuşturuculuk özelliğinin azalmasından kaynaklanacağı değerlendirilmektedir. Biyogazlı çift yakıt sisteminde özgül yakıt tüketimindeki artışın temel nedenin gazın sahip olduğu düşük yanma oranı olabileceği değerlendirilmektedir.

Enerji Muhasebesinin önemli kavramlarından biri de, "birim üretim başına enerji tüketimi" olarak da açıklanan "Özgül Enerji Tüketimi" kavramıdır. Bu kavram Enerji Yoğunluğu olarak da adlandırılmaktadır. Bu değerin hesaplanması üreticiye, birim üretim başına enerji tüketiminin aynı alanda kullanılan farklı ürünlerin karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Özgül enerji tüketimi ayrıca üretim ile enerji tüketimi ilişkisini, enerji maliyetlerini, işletmenin enerji yoğunluğunu izlemek ve bunları iyileştirici çalışmaları desteklemek için de kullanılmaktadır. Özgül enerji tüketimi açısından incelenen değerler de eş zamanlı olarak kullanılan yakıtların enerji tüketimleri ortak olarak ifade edilmiştir. Buradaki enerji tüketim maliyetlerinin motor yüküne bağlı olarak değişimleri Şekil 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18 Özgül enerji tüketiminin motor yüküne bağlı değişimi.

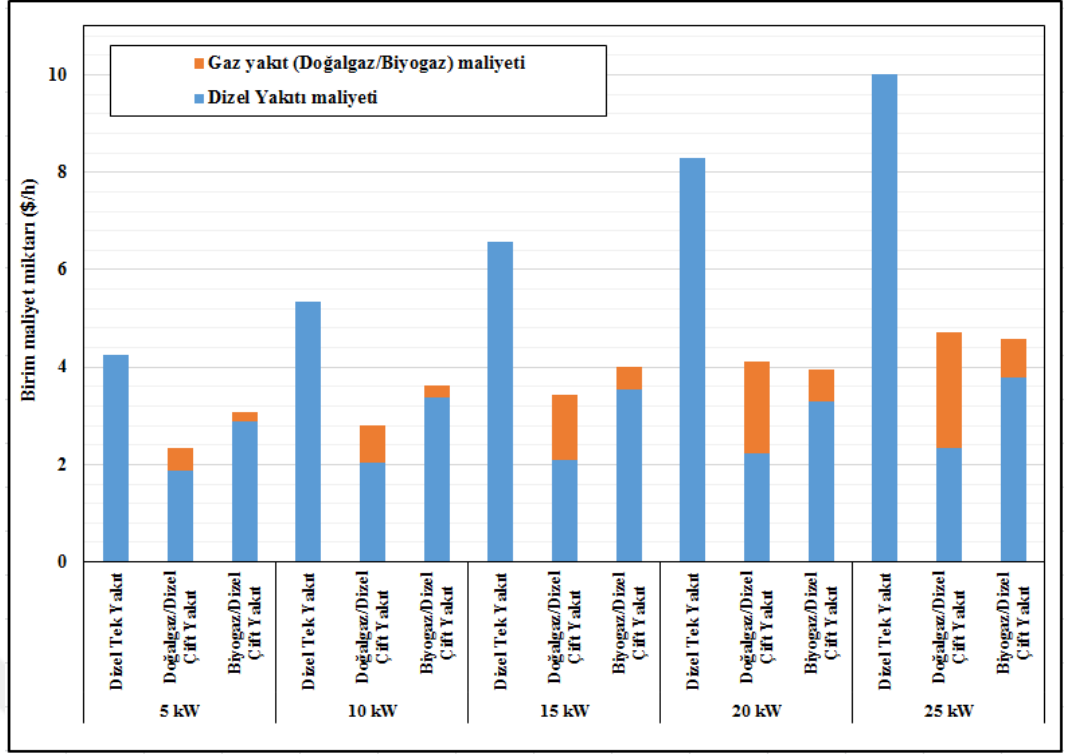
5 kW yük altında tek yakıt dizelde yaklaşık 23000 kJ/kWh enerji tüketimi söz konusu iken motor yükünün artmasına bağlı olarak bu değer önemli miktarda düşüş göstererek 11134 kJ/kWh değerine inmiştir. Tam yük altında enerji tüketim

miktarları % 53,38 oranında düşmüştür. Doğalgaz/dizel çift yakıtlısında 5 kW'da 19400 kJ/kWh olan enerji tüketim miktarının da 25 kW yükte 11600 kJ/kWh'a kadar düştüğü kaydedilmiştir. Doğalgazlı çift yakıt sisteminde tam yük altında enerji tüketim miktarı % 40,15 oranında azalmıştır. Aynı şekilde biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda söz konusu tüketim değeri 25500 kJ/kWh olurken 25 kW tam yükte hesaplanan tüketim değerinin 11800 kJ/kWh olduğu görülmüştür. Biyogazlı sistemde motor yükünün artışı ile enerji tüketim miktarındaki düşüş % 53,8 olarak belirlenmiştir. Motor yükündeki artışa bağlı olarak tüm yakıtlarda enerji tüketiminin önemli oranlarda düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu durum, motorun daha verimli çalışma şartlarına yaklaşmasına bağlanmaktadır. Üretici firmalar tarafından kullanım yeri ve amacına uygun olarak maksimum verimin alınacağı çalışma şartlarına uygun olarak motor imali gerçekleştirilmektedir. Tam yük altında motorun çalıştırılması durumunda hem en yüksek performans elde edilirken hem de minimum enerji tüketimine ulaşılabilmektedir.

Motor yükünün artması ile yanma odasına püskürtülen ve emme kanalıyla içeri alınan yakıt miktarı artmakla birlikte yanma iyileşmektedir. Tam yük altında motorun optimum çalışma koşullarına ulaştığı ve bu sayede yanma odası içerisine alınan kimyasal enerjinin diğer yük kademelerine kıyasla daha büyük oranda önce ısı enerjisine sonrasında ise mekanik enerjiye dönüşümünün yapılabildiği sonucuna varılmaktadır.

5.8 Enerji maliyeti ve özgül enerji tüketim maliyeti

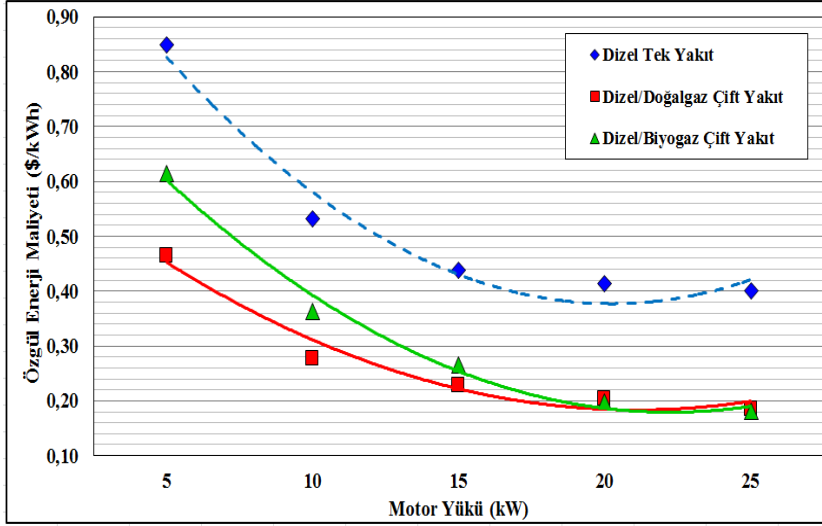
Deneylerde sarf edilen yakıtlara ait maliyetler ayrı ayrı çıkarılmıştır. Dizel yakıtı ve doğalgaz yakıtlarının tüketim değerleri güncel KDV'li pompa ve şebeke satış ücretleri üzerinden belirlenmiş ve dolara çevrilmiştir. Biyogaz tüketimi için ise tesis kurulumu ve giderler (kurulum maliyeti ve bakım onarım giderleri) kullanılarak bir maliyet tablosu oluşturulmuş ve yıllık değerler esas alınarak saatlik tüketim bedeli belirlenmiştir. Dizel tek yakıtlı, doğalgaz ve biyogaz çift yakıtlıları olmak üzere maliyetler Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Burada dikkat çekilmek istenen hususlardan bir diğeri de çift yakıt sistemi sayesinde motor yükündeki artışa karşılık maliyetlerin yatay bir şekilde seyretmesidir.



Şekil 5.19 Saatlik tüketim maliyetlerinin motor yükü ve yakıt sistemlerine göre değişimi.

Dizel tek yakıtlı koşulunda saatlik yakıt maliyeti motor yükündeki artışla birlikte % 136 oranında yükselirken (4,25 \$'dan 10,02 \$'a), doğalgazlı çift yakıtta % 109 (2,34 \$'dan 4,70 \$'a), biyogazlı çift yakıt koşulunda ise % 55 (3,08 \$'dan 4,57 \$'a) oranında artmaktadır. 20 ve 25 kW motor yüklerinde biyogazın yanma veriminin artmasına bağlı olarak maliyet etkinliğinin daha da yükseldiği Şekil 5.19'daki değerlerden anlaşılmaktadır. Biyogaz odaklı veriler incelendiğinde, 5 kW yükte tek yakıtla kıyasla % 25,17, 10 kW'da % 29,73, 15 kW'da % 35,96, 20 kW'da % 48,43 ve son olarak tam yükte (25 kW) % 51 oranında saatlik yakıt maliyetlerinin düşürüldüğü de yapılan hesaplamalar neticesinde tespit edilmiştir.

Sistemin özgül enerji tüketim maliyetleri açısından da inceleme yapıldığında, tüm yük koşullarında çift yakıt sisteminin yine daha ekonomik olduğu görülmektedir (Şekil 5.20).



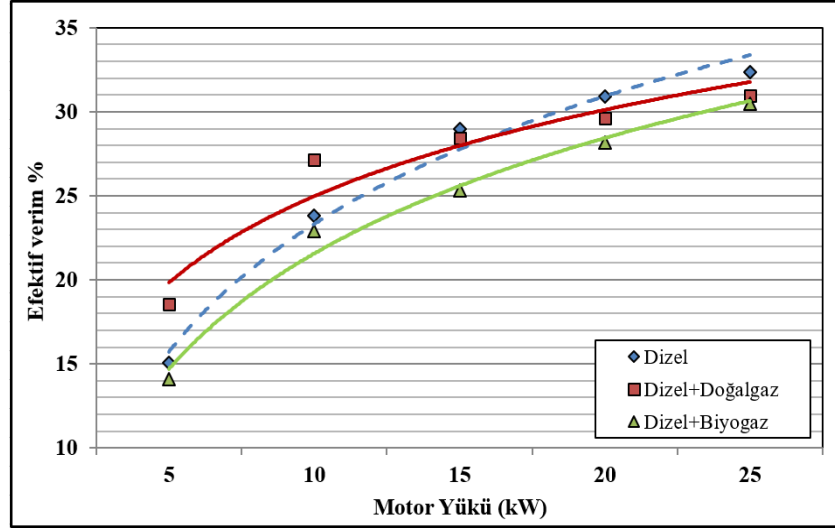
Şekil 5.20 Özgül enerji tüketim maliyeti.

Motor yükünün artmasına bağlı motor performansında meydana gelen artış ile birlikte özgül tüketim maliyetlerinin tüm yakış sistemi koşullarında düştüğü gözlenmiştir. Biyogazın çift yakıt olarak kullanıldığı sistemde, biyogazın düşük ısı değeri ve yanma hızı sebebiyle doğalgaza kıyasla daha yüksek değerler sergilediği kaydedilmiştir (Şekil 5.20). Bununla birlikte tek yakıtta göre tüm yüklerde sırasıyla, % 27,6, % 31,7, % 39,2, % 52,2 ve % 54,6 oranında daha iyi özgül tüketim maliyeti sergilemiştir. Düşük ve orta yük kademelerinde en iyi değerlere doğalgaz/dizel çift yakıtlı koşulunda ulaşılırken, 20 ve 25 kW yüklerinde biyogazın daha verimli olduğu görülmektedir. Tam yükte yakıt/yakıt sistemlerinin özgül enerji tüketim maliyetleri ise tek yakıtta 0,40 \$/kWh, dizel/doğalgaz çift yakıtlısında 0,19 \$/kWh ve dizel/biyogaz çift yakıtlısında 0,18 \$/kWh olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, çift yakıt sisteminin ve biyogazın kullanımının performans ve emisyonlar açısından olduğu kadar maliyetler açısından da olumlu etkilerinin olduğu görülmektedir.

5.9 Motor efektif veriminin incelenmesi

Motorun yakıt tüketimi ve kullanılan yakıtların ısı değerlerine bağlı olarak hesaplama yöntemiyle elde edilen efektif verim değerleri, Şekil 5.21’de sunulmuştur.

Artan yüke bağlı olarak söz konusu verimin de, tüm yakıt koşullarında artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.21 Motor efektif veriminin değişimi.

Düşük motor yüklerinde efektif verimin tüm yakıtlar için % 15-18 aralığında seyrettiği tespit edilirken, yük artışı ile bu değer % 30-32 aralığına ulaşmıştır. Düşük ve ara yük kademelerinde doğalgaz/dizel çift yakıtlısının diğer yakıt ve sistemlere kıyasla daha yüksek efektif verime sahip olduğu görülürken yüksek ve tam yük kademelerinde dizel tek yakıtlı sistemden maksimum efektif verim elde edilmiştir. Biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda ise tüm yüklerde düşük efektif verim elde edilmiştir. Tam yük altında dizelde % 32,33, doğalgaz/dizel çift yakıtında % 30,98 ve biyogaz/dizel çift yakıtında ise bu değer % 30,47 olarak elde edilmiştir. Biyogaz/dizel çift yakıtlısında efektif verimin dizele kıyasla tam yükte % 5,75'e düştüğü görülmektedir. Efektif verimdeki bu değişim, genel olarak ifade edildiğinde farklı özelliklere sahip yakıtların geç yanması nedeniyle daha fazla ısı kaybıyla ilişkili olduğu bilinmektedir.

Motor yükünün artmasına bağlı olarak, silindir içerisine alınan hava/gaz karışımının kütlesinin artması yanma odası maksimum sıcaklığını da artırmaktadır. Bu sayede silindir içerisine alınan toplam yakıtın da kendi kendiliğinden tutuşmaya daha eğilimli olduğu bilinmektedir (Selim, 2004). Yük artışı ile birlikte gaz yakıt miktarı artırılır iken aynı zamanda pilot yakıt miktarı da artmaktadır. Pilot yakıt miktarındaki bu artış ile tutuşma esnasında daha fazla enerji salınımı söz konusu olmakla birlikte enjektörden püskürtülen yakıt kütlesinin artması yakıtın karakteristiğinin (atomizasyonun ve yakıt hüzmelerinin) iyileşmesine sebep olmaktadır. Artan pilot yakıt miktarı ile hava/gaz karışımının

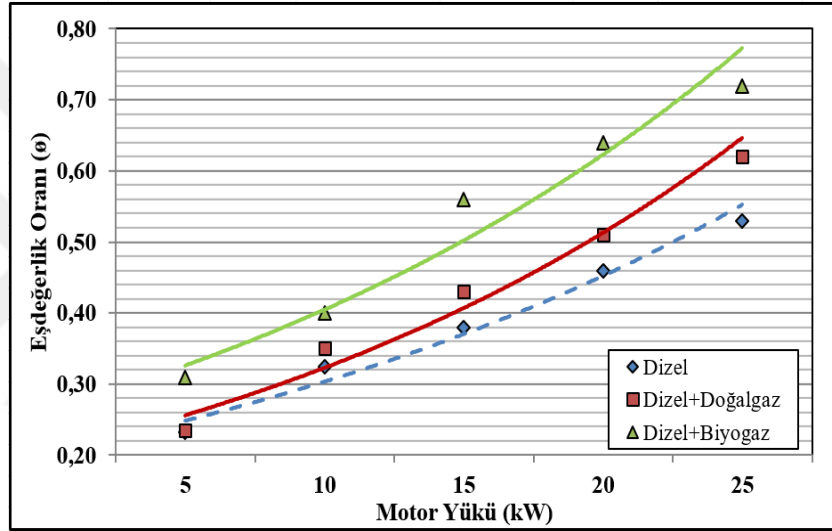
daha homojen olması sağlanabilmektedir. Daha kısa alev mesafesine sahip çok sayıda alev çekirdeğinin oluşması ve bu durumun da yanma odası içerisindeki karışımından daha yüksek oranda ısıl dönüşüm elde edildiği değerlendirildiğinden, efektif verim tüm yakıt koşullarında artmaktadır. Ayrıca çift yakıtlı sistemlerde yanma aşamaları dizel yakıtının yanma aşamalarına kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahip olduğu önceki bölümlerde ifade edilmiştir. Doğalgazın daha yüksek ısıl değere sahip olmasına karşılık, efektif veriminin dizele oranla daha düşük olması doğalgazın kendiliğinden tutuşma sıcaklığının daha yüksek olmasına ve alev yayılma hızının yavaşlığına bağlıdır. Dolayısıyla düşük alev hızı yanmanın gecikmesine ve ısı kayıplarının artmasına sebep olmakta bu durum da termik verimin düşmesi ile sonuçlanmaktadır.

Geciken yanma ve yüksek hava/yakıt oranı gereksinimleri silindir içerisine alınan yakıtın bir kısmının yanamamasına sebep olmakta ve müteakip bölümlerde de görüleceği üzere, CO emisyonunun artmasına sebep olmaktadır. Yanamayan yakıtların sahip olduğu enerjiden faydalanılamaması neticesinde de, termik verimde dizele kıyasla düşüşler olması muhtemel olarak değerlendirilmektedir. Bu ifadelerle ilave olarak, içeri alınan dolgu miktarıyla negatif sıkıştırma işinin artması ile büyük miktardaki biyogaz/hava karışımının yanma odasına alınması ve silindir duvarına doğru oluşan daha yüksek ısı transferinin de verim düşüşünde pay sahibi olabileceği düşünülmektedir. Buna karşılık yüksek ve tam yük altında yanıcı karışımdaki gaz konsantrasyonunun, alev yayılma hızının artması ile de ısı veriminin yükselebileceği literatüre uygun olarak gözlenmiştir (Ehsan ve Bhuiyan, 2009).

Çift yakıtlı motor sistemlerinde, kısmi yük şartları altında püskürtme avansının artırılmasının bu yükler altındaki termik verimi iyileştirebileceği kıymetlendirilmekle birlikte, yüksek yükler altında püskürtülen yüksek miktardaki pilot yakıtında (özellikle düşük ısıl değere sahip biyogazlı sistemlerde) avans değişiminin çok önemli bir değişikliğe sebep olamayacağı düşünülmektedir. Ayrıca püskürtme avansının değişmesinin, anlık çift yakıttan tek yakıtı geçişlerde sorun olabileceği ve geniş yakıt yelpazesine ilişkin aksaklıklara neden olabileceği de değerlendirilmektedir.

5.10 Yakıt eşdeğerlik oranının incelenmesi

Yakıt eşdeğerlik oranı, gerçek yakıt/hava oranının stokiyometrik yakıt/hava oranına kıyası olarak tanımlanmaktadır. Hava fazlalığı ile çalışan dizel motorlarda hava fazlalık katsayısı yerine daha yaygın olarak, yakıt eşdeğerlik oranı kullanıldığından, bu çalışmada da bu terim tercih edilmiştir. Temel olarak yakıt eşdeğerlik oranı, hava fazlalık katsayısının tersidir. Dolayısıyla ϕ simgesi ile gösterilen bu değerde, $\phi < 1$ fakir karışımı, $\phi = 1$ stokiyometrik karışımı ve $\phi > 1$ ise zengin karışımı ifade etmektedir. Eş değerlik oranına ilişkin veriler ve trend eğrileri Şekil 5.22’de gösterilmektedir.



Şekil 5.22 Yakıt eşdeğerlik oranının motor yüküne bağlı olarak değişimi.

Yakıt eşdeğerlik oranının, motor yükündeki artış ile birlikte tüm yakıt sistemlerinde arttığı görülmektedir. Bu artış eğilimi sırasıyla, biyogaz/dizel çift yakıtlısı, doğalgaz/dizel çift yakıtlısı ve dizel tek yakıtlı olarak gerçekleşmiştir. Motorun düşük yüklerinde yaklaşık 0,23-0,31 aralığındaki yakıt değişim oranı, yüklerle birlikte düzenli olarak artarak tam yükte, dizel tek yakıtlısında 0,53, doğalgaz/dizel çift yakıtlısında 0,62 ve biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda 0,72 değerine ulaşmıştır. Yakıt eşdeğerlik oranı, 25 kW yükte dizel tek yakıtlısına oranla biyogaz/dizel çift yakıtlısında % 35,85 daha yüksek değere ulaşmıştır. Tüm koşullarda da en yüksek oranlar biyogaz/dizel çift yakıtlısında izlenmiştir.

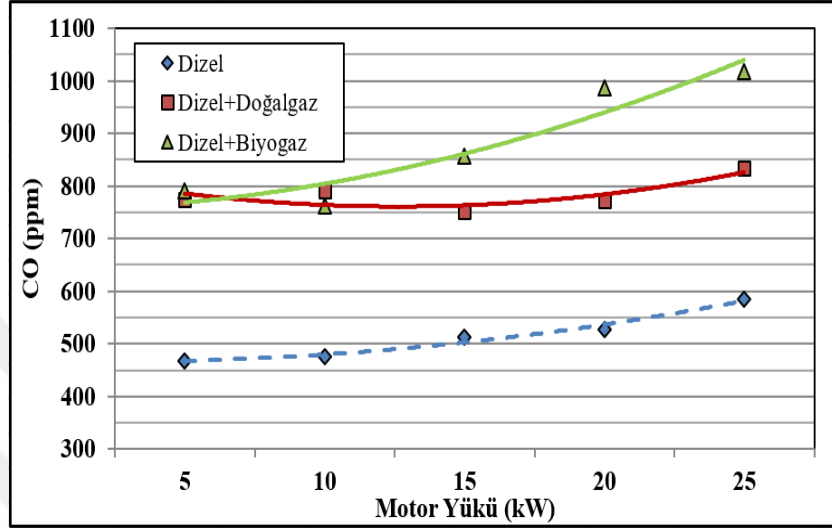
Yakıt eşdeğerlik oranının artması veya diğer bir ifade ile hava fazlalık katsayısının azalması silindire alınan gaz yakıtın miktarının artmasına bağlı olarak işgal ettiği hacmin de artmasının bir sonucudur. Bu durum hava akışının kısılmadığı dizel motorlar için kontrolü zor bir durumdur. Bu durumda yükte artış ile birlikte silindir içerisine alınan hava miktarı azalmakta bu da eksik yanma emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Hava miktarının azalması ile metan sayısı yüksek diğer ifade ile yanmaya karşı direnci yüksek gazların yanma süreleri daha da uzamakta bu da alevin yayılma hızını düşürmektedir. Alev hızının düşmesi yanmanın genleşme stroğuna sarkarak hacim genişlemesinin artmasına ve yakıt molekülleri arasındaki mesafelerin uzaması ile alevin bölgesel olarak son bulmasına neden olmaktadır. Bu durumda da HC ve CO gibi istenmeyen eksik yanma emisyonları meydana gelmiş olacaktır. Biyogaz/dizel çift yakıtlısında da yukarıdaki durumun söz konusu olabileceği değerlendirilmektedir. Çünkü emme havasında hava ve biyogazın homojen olarak karıştırılarak yanma odasına alınması sağlanmaktadır. Motor yükünün artmasına bağlı olarak, sabit motor hızında hacimsel olarak içeri alınan hava miktarında biyogaz hacmi kadar kısım silindir içerisine alınamayarak ve dolayısıyla normal çalışma şartlarından daha düşük hava miktarı yanma reaksiyonuna dâhil edilmiştir. Yük artışı ile hem gaz yakıt miktarı hem de bu gaz yakıtı tutuşturacak pilot dizel miktarının artması, yanma odası içerisine yakıt eşdeğerlik oranının artmasına ve karışımın zenginleşmesine sebep olacağı kıymetlendirilmektedir. Bu durumun emme havasındaki O₂ konsantrasyonunun düşmesinin yanında biyogazın sahip olduğu daha düşük politropik indeks (biyogaz: 1,305; hava: 1,400) nedeniyle de püskürtme sırasındaki dolgu sıcaklığının azalmasına ve bunun sonucunda da tutuşma gecikmesinin uzamasına neden olabileceği değerlendirilmektedir.

5.11 Egzoz emisyonlarının incelenmesi

Egzoz emisyonları önce dizel tek yakıtlı, müteakiben de doğalgaz/dizel çift yakıtlı ve biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşullarında ölçülmüştür. Ölçümler üçer kez tekrarlanarak ortalamaları alınmış ve elde edilen verilen kaydedilmiştir. Bu durum tüm yük koşullarında aynı şekilde tekrarlanmıştır. Yapılan bu çalışmada emisyon cihazı olarak bir baca gazı ölçüm cihazı kullanıldığından CO,

CO₂, NO_x ve O₂ değerleri ölçülmüştür. Değerlendirme öncesinde baca gazı emisyon cihazının kalibrasyonları yapılmış, sensör ve filtreleri kontrol edilmiştir.

CO emisyonunun motor yüküne ve değişik yakıt koşullarına bağlı olarak meydana gelen değişimler Şekil 5.23’de gösterilmektedir.



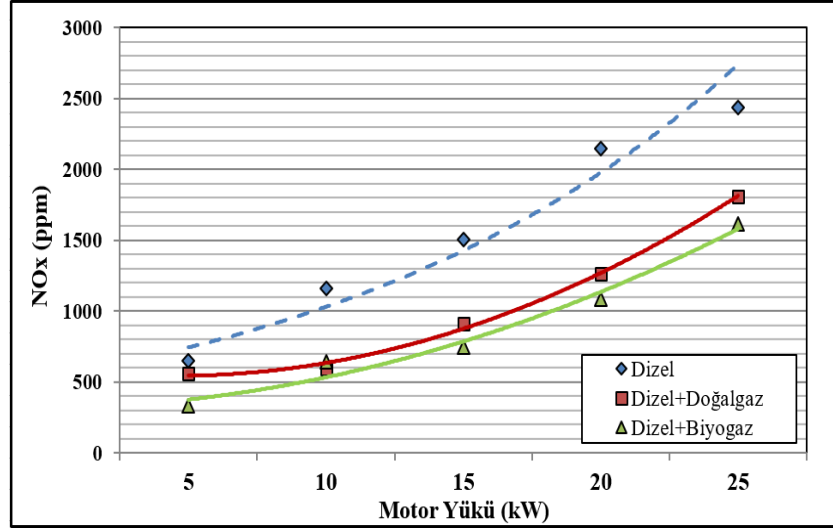
Şekil 5.23 CO emisyonunun motor yüküne bağlı olarak değişimi.

CO emisyonu, dizel tek yakıtlısında yüke bağlı olarak çok değişmeyen daha yatay bir gelişim sergilemektedir. Tek yakıtta, 468 ppm seviyesinde olan CO emisyonunun tam yükte 585 ppm seviyesine yükseldiği tespit edilmiştir. Doğalgaz çift yakıtlısında da CO emisyonunda tek yakıtlıya benzer karakterde veriler ölçülmüştür. Bu çalışma şeklinde artan yüke bağlı olarak CO değişimi daha yatay bir değişim göstermiş ve 5 kW yük altında 774 ppm olarak kaydedilen emisyon değeri tam yük altında % 7,2 artış göstererek 834 ppm seviyesine yükselmiştir. Biyogaz kullanılan çift yakıt sisteminde ise eksik yanma ürünü olan CO gazının yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. 5 kW yükte 790 ppm olarak ölçülen bu değer diğer yüklerde sırasıyla 763 ppm, 857 ppm, 987 ppm ve 1017 ppm olarak ölçülmüştür. Biyogaz/dizel çift yakıtlısındaki CO emisyonu artış oranı % 22,32 olarak gerçekleşmiştir. Çift yakıtlı motor sistemlerinde özellikle de biyogazın kullanıldığı sistemlerde yanmanın eksik olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Bu nedenle, çift yakıtlı biyogazın kullanıldığı motorlarda katalitik konvektör gibi ilave emisyon giderici düzeneklerin kullanılması gerekmektedir.

Normal şartlar altında dizel motorlarında yanma dört aşamadan meydana gelirken, çift yakıtlı motorlarda gaz yakıtın da bir tutuşma gecikmesi olduğundan toplamda beş fazlı yanma gerçekleşmektedir. Bu nedenle, yanma odası içerisinde sıkıştırılan gaz yakıtın difüzyon yanma kademesi genel yanma reaksiyonlarının uzamasına bağlı olarak genişleme stroğuna sarkmaktadır (Karim, G.A., 1980; Yoon, S.H. and Lee, C.S., 2011). Bu sarkmaya bağlı olarak da hacim genişlemesi meydana gelirken alevin yayılma hızı düşmekte, yanma odası sıcaklığının azalmasına bağlı olarak da yanmanın eksik kaldığı bölgelerin çoğalmasına sebep olmaktadır. Beş kademeli yanma reaksiyonuna ilave olarak önceki bulgularda da ifade edildiği gibi metan sayısının yüksek olması sebebiyle özellikle biyogazda bu eksik yanma sonucu CO emisyonu oluşumunun literatüre uygun olarak yüksek değerlere ulaştığı kaydedilmiştir. Bu ifadelerle ilave olarak, çift yakıtlı sistemlerde silindir içerisine alınan dolgunun bir kısmının gaz yakıt tarafından işgal edilmesi sonucu O_2 konsantrasyonunda azalma olmaktadır. Dolayısıyla, yanma odası içerisinde heterojen yapıdaki hava yakıt karışımlarında muhtemel fakir ve zengin karışım bölgelerinde artışa sebep olabilmektedir. Bölgesel O_2 konsantrasyonundaki düşüş yanmanın eksik kalmasına ve CO emisyonunun yükselmesine sebep olmaktadır.

Aynı zamanda, emme havasına biyogazın dâhil edilmesi, dolgu içerisine taze hava ile birlikte CO_2 gazının da karıştırılması anlamına gelmektedir. Bu karışıma sahip dolgu pilot yakıtın tutuşmasının ve türbülanslı alev yayılımının normale göre daha düşük sıcaklık ve yakıt eşdeğerlik oranı nedeniyle baskılanmasına sebep olmaktadır (Yoon, S.H. ve Lee, C.S., 2011). Bu baskı ortamı ve yukarıda ifade edilen diğer sebepler de düşünüldüğünde, yanmanın eksik yanma şeklinde gerçekleştiği değerlendirilmektedir. CO emisyonunun bu sebeple özellikle biyogaz/dizel çift yakıtlısında yüksek çıktığı kabul edilmektedir.

NO_x oluşumuna etki eden en önemli iki faktör, sıcaklık ve O_2 konsantrasyonudur. Yanma odasındaki sıcaklık $1600\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerine çıktığında havanın içindeki azot molekülleri O_2 ile birleşerek NO_x emisyonunu oluşturmaktadır. Ayrıca yakıt ve hızlı NO_x oluşumu da egzoz gazı içerisindeki NO_x konsantrasyonun artmasına katkı sağlar, fakat ısı NO_x oluşumu yanında ihmal edilebilecek seviyededir (İleri, E., 2012).



Şekil 5.24 NO_x emisyonunun motor yüküne ve yakıt tipine göre değişimi.

Yapılan çalışma neticesinde NO_x emisyonundaki değişimler de değerlendirmeye alınmıştır. Bu emisyon değerlerine ilişkin motor yüküne bağlı değişimler Şekil 5.24'de gösterilmektedir. Tek yakıtlı dizel koşulunda NO_x emisyonu en düşük yük altında 650 ppm olarak ölçülürken yük artışı ile bu değer 2437 ppm seviyesine kadar çıktığı tespit edilmiştir. Tam yük kademesinde motordan çevreye salınan emisyon miktarının % 374,9 oranında arttığı görülmektedir. Doğalgazın ana yakıt olarak kullanıldığı çift yakıt sisteminde NO_x emisyonu daha düşük seviyelerde oluşmuştur. 5 kW motor yükü altında 560 ppm olan bu emisyon değeri, motor yükündeki artışa bağlı olarak yükselmiş ve tam yük altında 1811 ppm olarak ölçülmüştür. Yük artışına bağlı olarak emisyon miktarındaki artış, % 323,4 olmuştur. Biyogaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda NO_x emisyonu 330 ppm iken, yükteki artışa bağlı olarak 1614 ppm seviyesine kadar yükselmiştir. Biyogazdaki emisyon artış oranı da, % 489 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yakıt tiplerinde motor yükündeki artışa bağlı olarak NO_x emisyonu artmaktadır. Yükteki bu artış ile çevrim başına yanma reaksiyonuna giren yakıt miktarı da artmakta, bunun sonucu olarak da yanma sıcaklığı yükselmektedir. NO_x emisyonunun yüksek yanma sıcaklığı ve yüksek O₂ konsantrasyonu tarafından desteklenen bir emisyon olduğu bilinmektedir (Heywood, J.B., 1988; Aktaş, A. ve Doğan, O., 2010). Bu nedenle sıcaklık ve O₂ miktarının artışına bağlı olarak, motordaki NO_x emisyonu yükselmektedir.

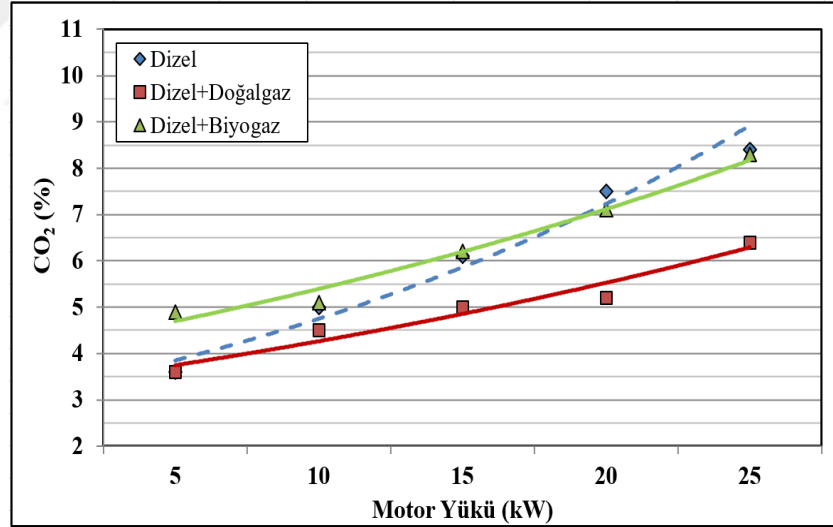
Yakıtlar, yük artışı ile birlikte artış eğilimi sergilemektedirler. Ancak, aynı yük koşulu altındaki değerlerin ve artış miktarlarının kıyaslanmasının daha anlamlı sonuçlar vereceği değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, dizel yakıtında oluşan NO_x emisyonunun yük şartlarına bağlı olarak doğalgaz çift yakıtlısı ve biyogaz çift yakıtlısı ile mukayesesi yapılmıştır. Yüke bağlı değişimde doğalgazın ana yakıt olarak kullanıldığı testlerde NO_x emisyonundaki düşüş miktarının sırasıyla; 5 kW'da % 13,9, 10 kW'da % 49, 15 kW'da % 39,4, 20 kW'da % 41 ve 25 kW'da ise % 25,7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Biyogaz/dizel çift yakıtlısı ile yapılan aynı testlerde ise NO_x emisyonunun, 5 kW'da % 49,2, 10 kW'da % 44,8, 15 kW'da % 50,5, 20 kW'da % 49,5 ve 25 kW'da ise % 33,8 oranında azaltılabildiği görülmüştür.

Doğalgaz ile yapılan testlerde NO_x emisyonu azalmakla birlikte stabil bir düşüş gözlenememiştir. Yük değişimlerinde emisyon değişimlerinde dalgalanmaların olduğu, dolayısıyla yanma performansının ve reaksiyonlarının değişkenliğinin fazla olduğu değerlendirilmektedir. Bunun muhtemel sebebi olarak da silindir içerisinde homojen bir dağılımın olmadığı düşünülmektedir. Bunun yanında biyogaz/dizel çift yakıtlısı ile elde edilen NO_x emisyonlarının ve dizel tek yakıtına göre değişim oranlarının çok stabil olduğu görülmektedir. Biyogazın doğalgaza kıyasla daha stabil yandığı, silindir içerisinde daha homojen olarak dağılım sağladığı değerlendirilmektedir.

Biyogazın içeriğindeki CO_2 miktarı, emme zamanında silindir içerisine alınan havanın azalmasına dolayısıyla da O_2 konsantrasyonunun seyrelmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, biyogazın emme sistemine indüksiyonu ile çalışma akışkanının (dolgunun) spesifik ısı kapasitesini arttırmakta ve böylece alev yayılımının yavaşlaması ve yanma işlemi sırasında yanma sıcaklığının düşürülmesi sağlanmış olmaktadır (Yoon, S.H., 2011). Bu kapsamda, elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğu değerlendirilmektedir.

CO_2 emisyonu, dizel motor içerisinde bulunan fazla havanın varlığı sayesinde yakıtın tamamının yakılabildiğinin göstergesidir. Diğer bir ifade ile yakıtın ihtiva ettiği karbonun tamamının yeterli hava şartlarında O_2 ile birleşebilmesidir (Barik, D. and Murugan, S., 2014).

Küresel ölçekte atmosferde CO₂'in sürekli olarak artması iklim değişikliklerine neden olmakla birlikte taşıtlardan kaynaklanan gaz emisyonları içinde en zararsızlarından biri olarak görülmektedir. Sera gazı olarak da nitelendirilen CO₂'in artışı ile güneşten kaynaklanan uzun dalga boylu radyasyonun tekrar uzaya yansması engellenmekte ve bu nedenle yeryüzünün sıcaklığı sürekli olarak artmaktadır. CO₂ salınımının azaltılmasında biyoyakıt kullanımının yaygınlaştırılması önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Biyoyakıtların tüketimi esnasında çevreye salınan CO₂, üretim sürecinde yeniden çevreden emilmektedir. Biyogazın da bir biyoyakıt olduğu ve hammadde kaynağının bitkilerden, hayvansal atıklara, mutfak atıklarından kanalizasyon atıklarına kadar çok geniş bir yelpazesinin olması nedeniyle bu emilim ciddi oranda gerçekleşmektedir. Burada grafiksel olarak ifade edilen CO₂ emisyon değeri sadece motorda yakımı sayesinde ortaya çıkan miktarı göstermektedir ve değerlendirmeler bunun üzerinden yapılmaktadır. Çalışma esnasında açığa çıkan CO₂ emisyon değerleri Şekil 5.25'de gösterilmektedir.



Şekil 5.25 CO₂ emisyonunun motor yüküne bağlı değişimi.

Genel olarak, en yüksek CO₂ emisyonu düşük ve orta yük kademelerinde dizel/biyogaz çift yakıt sisteminde, yüksek ve tam yük kademelerinde ise dizel tek yakıtlı sistemden elde edilmektedir. Doğalgaz/dizel çift yakıtlısı tüm yük kademelerinde en düşük CO₂ emisyonu oluşturmuştur. Tüm yakıt sistemlerinde motor yükünün artışına bağlı olarak CO₂ emisyonu değerinin yükseldiği, bu yükselişin dizel ve biyogazda daha keskin olduğu Şekil 5.25'de görülmektedir.

Yükün artmasına bağlı olarak motorun daha verimli çalıştığını ve yanmanın optimum şartlarına ulaşıldığını göstermektedir. Tam yük kademesinde, biyogaz/dizel çift yakıtlısının CO₂ emisyon değerinin dizele kıyasla % 1,19 daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde doğalgaz/dizel çift yakıtlı çalışma koşulunda ise %23,8 oranında düşük çıkmıştır. İçeriğinde % 40 oranında CO₂ bulunduran biyogazın yakımı ile daha yüksek miktarda CO₂ emisyonu beklenmesine karşılık benzer sonuçlar ile literatürde de karşılaşılmıştır (Yoon, S.H. and Lee, C.S., 2011; Barik, D., Murugan, S., 2014; Koten, H., vd., 2014; Wu, H.W., et al., 2014; Sahoo, B.B., et al., 2009). Emme havası içerisinde biyogaz miktarı kadar daha az havanın silindir içerisine gönderilmesi, yanma odası sıcaklığının düşmesine bağlı olarak reaksiyon esnasında alevde sönmelerin meydana gelmesi, yanmanın kısa sürelerde kesik kesik gerçekleşme durumları nedeniyle eksik yanmanın olduğu değerlendirilmektedir. Bu reaksiyonların neticesinde de CO₂ emisyonları azalırken, CO emisyonlarının yükselmesine önemli oranda sebep olduğu düşünülmektedir.

5.12 Deney düzeneğinin belirsizliği

Deneysel çalışmalarda ulaşılan sonuçların yanında, ölçümü yapılan değerlerin doğruluğu da büyük önem taşımaktadır. Doğruluğu etkileyen en önemli etken ise, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır. Hata; bir niceliğin ölçülen değeri ile gerçek değeri arasındaki farktır. Belirsizlik; ölçümlerdeki hataların tam olarak bilinmemesidir. Bir ölçüm hatası, çoğu zaman birçok nedenden kaynaklanan çok sayıda bağımsız hataların sonucunda oluşur. Hata analizi, bu bağımsız hataların genel hata üzerindeki etkilerini değerlendirme çalışmasıdır. Ölçüm hatası hiçbir zaman tam olarak bilinemez. En iyi ihtimalle, içinde gerçek değer yer aldığı bir bölge belirlenebilir. Bu bölge belirsizlik olarak adlandırılır ve hatanın olası bir büyüklüğünün ifadesidir. Belirsizliğin gerçekçi bir ölçümüne ulaşmak için tüm potansiyel hata kaynaklarının etkilerinin tam olarak belirlenmesi gerekir (Erken, N., 2008; Ulukış, S.Y., 2010).

Standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde de yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerde, hata üç farklı şekilde ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan biri, ölçüm cihazının veya teçhizatın yanlış kullanımı

ile ortaya çıkan kaba hatalar olarak nitelendirilmektedir. İkincisi, cihaz veya teçhizat ile çevreye bağlı hatalar ile teçhizattaki arızalı ve aşınmış malzemelere bağlı olarak oluşan sistematik hatalardır. Sonuncusu ise ölçme performansını etkileyen birçok faktörün rastgele salınımı sonucunda oluşan rastgele hatalardır. Bu tip hataların genliklerinin genellikle belli olmaması literatürde belirsizlik olarak adlandırılmaktadır (Holman, 1994; Anonim 13, Hitit Üniversitesi; Asan ve Namlı, 1997; İleri, 2010). Günümüzde, sonuçların doğruluğunun teyit edilmesi için kontrol maliyetlerinin düşürüldüğü sayısal ve istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir.

Bir sistemi oluşturan elemanların seçiminde ve etkin bir sistemin oluşturulmasında en önemli etken belirsizlik faktörü ve belirsizlik analizidir. Belirsizlik analizinde, ölçüm sistemi içerisinde yer alan belirsizlik kaynakları çeşidine ve mühendislik tecrübesi ile ortaya çıkan yöntemlerle gerçek değere en yakın şekilde doğru sonucun bulunması amaçlanır. Bu analiz, sadece sonuçların yorumlanmasında değil, aynı zamanda ölçüm metodu ve ölçüm aracının belirlenmesinde de büyük rol oynar. Ölçülecek büyüklük ve ölçü araçlarının seçiminden önce belirsizlik analizinin yapılması ve buna uygun büyüklük ve ölçüm aracının seçilmesi, sonuçların içinde yer alacağı belirsizliğin minimuma indirilmesinde yardımcı olacaktır. Deneysel bulguların hata analizi için kullanılan belirsizlik analizi yöntemine göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ olarak belirlenmiştir. Bu durum, $R=R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ şeklinde ifade edilebilir. Bağımsız değişkenlere ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve yukarıda ifade edilen R 'nin hata oranı w_R olarak gösterilmektedir (Kline and Clintock, 1953; Holman, 1994; Atmanlı, 2013).

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.1)$$

Test ünitesi ile ölçülen ve hesaplama yöntemi ile elde edilen parametrelerin tespitinde kullanılan ölçü aletlerinin belirsizlik değerleri, Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Ölçü aletlerinin hassasiyet değerleri

Ölçülen Büyüklük	Birim	Belirsizlik Değeri
CO emisyonu	ppm	± 10 ppm
CO ₂ emisyonu	%	$\pm \% 0,3$
NO _x emisyonu	ppm	± 5 ppm
O ₂ emisyonu	%	$\pm \% 2$
Baca gazı sıcaklığı	°C	± 2 °C
Gürültü emisyonu	dB	$\pm 1,5$ dB
Termal görüntü ölçümü	°C	0,07 °C
Titreşim sensörü	%	$\% 0,02$
Gaz sayacı hassasiyeti	%	$\pm \% 1,5$
Alternatör voltaj hassasiyeti	%	$\pm \% 1$
Yük bankası	%	$\pm \% 1,5$
Sıvı yakıt ölçüm cihazı	gr	$\pm 0,001$ gr
Devir	min ⁻¹	$\pm \% 0,2$

Çizelge 5.2’de ifade edilen hassasiyetlerde çalışan ölçü aletlerinin belirsizliklerine göre dizel tek yakıtlı çalışma koşulunda, 25 kW tam yük kademesinde saatlik yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi, efektif verim, özgül enerji tüketimi değerlerinin belirsizlikleri (5.1) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama neticesinde elde edilen veriler Çizelge 5.3’de ifade edilmiştir.

Çizelge 5.3 Hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik değerleri.

Hesaplanan büyüklük	Formül	Dizel tek yakıtı için nominal değerler	Hesaplama sonucu	
			Belirsizlik değerleri	Belirsizlik yüzdeleri
Saatlik yakıt tüketimi (g/h)	$B_e = b_e \cdot P_e$	7284		$\% 1$
Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	$b_e = \frac{B_e}{P_e}$	260.77		$\% 1$
Efektif verim (%)	$\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^6}{(b_{eD} \cdot LHV_D)}$	32.33		$\% 1,11$

Çizelge 5.3’te motor testlerinden ölçüm yoluyla elde edilen verilere bağlı olarak hesaplama yoluyla tespit edilebilen büyüklüklerin belirsizlikleri gösterilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Küresel nüfus artışına paralel olarak artan enerji ihtiyacı, beraberinde birçok sorunu da getirmektedir. Ülkelerin ekonomik istikrarından, bireylerin sağlığına, çevresel felaketlerden toplumsal sorunlara kadar çok geniş perspektifte bu etkiler görülmektedir. Kısa vadede enerjinin klasik kaynaklardan temininin yanında, alternatif kaynaklara önem verilerek hızla geliştirilmesi, uzun vadede ise ağırlığın özellikle yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklara verilmesi gerektiği açıkça görülmüştür. Biyokütle temelli enerji kaynağı olan biyogazın bu çerçevede incelenmesi ve sürdürülebilirliğinin tespiti önem arz etmektedir. Bu çalışma da, bu hedef doğrultusunda gerçekleştirilmiş olup elde edilen veriler ışığında tespit edilen sonuçlar müteakip paragraflarda ifade edilmiştir.

Biyogazın içeriğinde bulunan H_2S 'in etkilerinin simule edildiği yağ numuneleri ile yapılan testlerde yağlamayı bozucu etkilerin olduğu tespit edilmiştir. Yağlayıcılık özelliğini kaybeden yağların metal parçalarındaki aşınmayı, kullanım süresine göre ortalama olarak % 50-70 oranında arttırdığı görülmüştür. Bu durum yağ değişim sürelerinin kısalmasına sebep olmaktadır. Ana yakıt olarak içeri alınan biyogazdaki H_2S , yanma reaksiyonu sonucunda H_2SO_4 'e dönüşmektedir. Asitik bu yapı, silindir cidarlarındaki yağa yapışarak, pistonun AÖN'ya hareketi esnasında segmanlar tarafından kartere sıyrılmaktadır. Ayrıca, kompresyon kaçakları ile segman setinden piston alt bölgesine kaçan gazların içeriğindeki asit buharı yoğunlaşarak da, karterdeki yağı etkilemektedir. Motorlarda bulunan pozitif karter havalandırma sistemi, yoğunlaşmış bu gazları da tekrar emme sistemine vererek yeniden yakılmasını sağlamaktadır. Ancak ham biyogaz ile çalışacak motorlarda bu durum asit buharının tekrar tekrar yanma reaksiyonuna sokulmasına neden olmaktadır. Her çevrimde yukarıdaki reaksiyonların tekrarlanması, kümülatif olarak artan miktarda asit birikintisinin motor yağını işgal etmesine ve yağın yağlayıcılık özelliğini kaybetmesine neden olmaktadır.

Biyogazın motorlarda kullanımı öncesinde içeriğindeki H_2S 'in uzaklaştırılması, en önemli basamaktır. Biyogaz reaktöründe hammadde olarak

kullanılan atıkların çürütülmesi ve nihai ürünlerin elde edilmesinde meydana gelen H_2S 'in sürekli olarak kontrol edilmesi ve düşük ppm seviyelerinde kalması için ilave önlemlerin alınmasının motorun ömrünün uzatılmasında ve yağ maliyetlerinin düşürülmesinde etkili olacağı değerlendirilmektedir. Bu amaca yönelik kullanılacak motorlardaki pozitif karter havalandırma düzeneği harici bir depo vb. alana aktarılarak asit buharının yoğunlaştırularak çökertilmesi ve sonrasında kalan gaz karışımlarının motora gönderilmesi ile karterde birikecek asit miktarının azaltılması sağlanabilir. Karter havalandırmasına fan düzeneği konulmasının da olumlu bir etki sağlayacağı düşünülmektedir.

Laboratuvar şartlarında yapılan bu deneylere ilave olarak, sahada kullanılan biyogaz ile çalışan kojenerasyon motorları da incelenmiştir. Buna göre 1500 saatlik çalışma neticesinde günlük kullanılan biyogaz içeriğindeki H_2S 'in, atığın muhteviyatına bağlı olarak sürekli dalgalandığı ve sabit bir değerde tutulamadığı görülmüştür. Motor yağının düzenli olarak değiştirildiği uzun süreli çalışma neticesinde motor yataklarında bozulmalar gözlenmiştir. Özellikle turbo yataklarının ve yağ soğutucu ünitelerinin etkilendiği, 5'inci bölümde görsel olarak da ifade edilmiştir. Bu nedenle, biyogaz motorunun yatak ve diğer önemli parçalarının yeniden tasarlanması ve farklı yatak malzemelerinin tercih edilmesi gerekmektedir.

Yağ ve malzeme çalışmalarının çoğaltılması, biyogazın sürdürülebilir bir kaynak olarak görülmesinde önemli bir basamaktır. Bu çalışmalar neticesinde ortaya çıkan yenilikler, özellikle küçük ölçekli işletmelerin sayısının hızla artmasını destekleyecektir.

Titreşim testlerinde, 5 kW, 10 kW, 15 kW, 20 kW ve 25 kW yük kademelerinde meydana gelen motorun yanal titreşimleri dikkate alınmıştır. Bu inceleme öncesinde mevcut titreşim verileri, "Fast Fourier Transform" metoduyla frekans verisine çevrilmiştir. Bu yöntemde veriler işlenirken tekrarlanmayan sinyaller dikkate alınmamış, karmaşık sinyallerin içinde periyodik olanları belirlenip bileşenlerine ayrılmıştır.

Dizel yakıtında meydana gelen piston titreşimleri referans olarak alındığında doğalgazın artan yüke bağlı olarak meydana getirdiği titreşimlerin de yükseldiği, özellikle tam yükte bu değerin oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. Yanma odası içerisinde artan sıcaklığa bağlı olarak hem pilot yakıtın hem de ana yakıt olarak kullanılan doğalgazın tutuşma gecikmelerinin kısalması, hatta yanma odasının farklı bölgelerinde her iki yakıtın birbirinden bağımsız alev çekirdekleri oluşturması dolayısıyla birbirine ters yönde oluşabilecek alev cephelerinin çarpışması neticesinde kontrolsüz ve daha büyük değerde basınç artışı meydana gelerek pistonun üzerine etki ettiği değerlendirilmektedir. Buna karşılık tüm yük koşullarında, biyogaz/dizel çift yakıtlısında daha düşük titreşim genlikleri meydana geldiği ve motorun daha yumuşak çalıştığı tespit edilmiştir.

Deney motorunun gürültü emisyonları ile titreşim verileri kıyaslandığında, birbirleri ile örtüştüğü görülmüştür. Yanmanın daha yumuşak gerçekleşmesi neticesinde titreşim genliği azalmakta, dolayısıyla piston çarpması daha düşük ataletle gerçekleşmektedir. Aynı zamanda metan sayısının yüksek olması sebebiyle vuruntu direncinin yükselmesi ve alevin yayılma hızının düşmesi neticesinde motordan çevreye yayılan yanma kaynaklı ses miktarının da düştüğü değerlendirilmektedir. Yakıta bağlı olarak değişen atalet kuvvetleri, motordaki tüm hareketli parçalardan kaynaklı titreşimi ve gürültü emisyonunu etkilemektedir.

Yakıt/yakıt sistemine bağlı olarak titreşim ve gürültü emisyonlarındaki düşüş sayesinde, özellikle jeneratör üretici firmaların, ses yalıtımı ve titreşim önleyici takozların kullanımında tasarruf elde edebileceği kıymetlendirilmiştir. Ayrıca bu sonuçlara göre, motorların ilave tedbir ve modifikasyonlar ile ayarlanmaları sayesinde çok daha sessiz ve düşük titreşimde çalışabileceğinin mümkün olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda, doğalgazın yakıt değişim oranının, biyogazın yakıt değişim oranından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Biyogazın bu aşamada yüksek değişim oranlarına çıkabilmesinin en büyük sebebi CO₂'nin yanmayı yavaşlatıcı etkisi ve vuruntuya karşı biyogazın sahip olduğu yüksek metan sayısı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sayede motorda vuruntuya sebep olmadan daha

yüksek miktarda biyogaz kullanılabilir iken pilot dizel yakıtının da daha ekonomik kullanımı söz konusu olmaktadır. Söz konusu yakıt değişim oranlarında farklı ayarlamalar ile % 90'dan daha yüksek değerlere ulaşılabilmesi mümkündür. Ancak motor yakıt sisteminin sahip olduğu enjektör ve enjektör memelerinde ciddi tahribatlar meydana gelebileceği ifade edilmektedir. Yoğun olarak ısıya maruz kalan enjektör memelerinin sıvı yakıt tarafından yeterince soğutulamaması neticesinde uzun süreli kullanımlarda yanma ve şekil bozuklukları meydana gelebileceği değerlendirilmektedir. Yakıt değişim oranlarında % 15'in altına inmek hedeflendiğinde, özel tip meme yapısına sahip enjektörlerin kullanılması gerekecektir. Bu durumun küçük ve orta büyüklükteki çiftlik veya işletmelerde önemli maliyet artışı getirmesi nedeniyle motorun orijinal enjektörlerinin kullanımına imkân tanıyacak miktarda değişim oranının ayarlanmasının daha fizibil olacağı düşünülmüştür.

Motor silindir bloğu, silindir kapağı ve manifoldların termal olarak izlenmesi neticesinde, sabit avans değerinde tüm yakıt ve çalışma koşulları altında önemli bir değişim olmadığı kaydedilmiştir. Değişmeyen parça sıcaklıkları sayesinde kapalı sistem jeneratörler için ilave tedbirlere ihtiyaç olmayacağı sonucu çıkarılmıştır. Bu durum kaplama/yalıtım malzemelerinin yangın riski açısından büyük önem arz etmektedir. Optimum avans ayarlarına bağlı olarak yapılması planlanan müteakip çalışmalarda, bu durum yeniden izlenecektir. Özellikle kapalı sistem şeklinde imal edilmekte olan jeneratörlerin, kaplama malzemelerinin, yakıta bağlı olarak değişen motor sıcaklıklarına gösterecekleri reaksiyonların imalatçı firmaların garanti şartlarına direk etki etmesi söz konusudur.

Doğalgaz ve biyogazın yüksek metan sayısı ve alevlenme sıcaklıkları nedeniyle yanma süresi ve yanma süresi öncesindeki tutuşma gecikmesinin etkilendiği bilinmektedir. Bu çalışmadaki egzoz gaz sıcaklıklarındaki değişim bunu bir kez daha göstermiştir. Test sonuçlarında, tüm yük kademelerinde doğalgaz/dizel çift yakıtlısında en yüksek egzoz gazı sıcaklığına ulaşılırken, en düşük sıcaklığa dizel tek yakıtlısında ulaşılmıştır. Elde edilen bu test verileri literatürde ifade edilen sebep-sonuç ilişkisini de doğrulamaktadır. Burada göz önünde bulundurulması gereken diğer bir husus, biyogazın içten yanmalı

motorlarda kullanımı esnasında avansın artırılması ile ısı enerjisinin ne kadarının faydalı enerjiye dönüştürülebileceğidir. Bu konu üzerine müteakip çalışmalar yapılarak, neticeleri akademik alanda paylaşılacaktır.

Biyogazın içeriğindeki CO₂ miktarı, biyogazın hem sahip olduğu ısı değeri hem de birim hacimde yanma odasına alınan yanabilir gaz miktarını düşürmektedir. Bu durum, neticesinde de özgül yakıt tüketiminin diğer yakıt/yakıt sistemlerine göre % 60'ın üzerinde yükselmesine sebep olduğu görülmüştür. Özgül yakıt tüketiminin bir yakıtın kullanımında veya sürdürülebilirliğinde tek başına etken olmadığı, bu değer yanında çevrecilik ve ekonomikliğin çok daha büyük öneme sahip olduğu akıldan çıkarılmamalıdır. Emisyon ve maliyet konularındaki ifadeler müteakip maddelerde belirtilmektedir.

Özgül enerji tüketim miktarının motor yükündeki artışa bağlı olarak, tüm yakıt sistemlerinde düştüğü tespit edilmiştir. Biyogazın yanma odası içerisinde yakımı esnasında enerji dönüşümünün diğer yakıtlara göre daha düşük olduğu 5'inci bölümde verilen Şekil 5.18'de görülebilmektedir. Biyogaz/hava karışımının oluşturduğu alev cephesi, mevcut zaman periyodu içerisinde tüm karışımı yakabilecek kadar hızlı değildir. Dolayısıyla çevrim olarak veya birim zaman olarak meydana gelebilen eksik yanma sonucunda, CO emisyonunda artış ile birlikte yeterli enerji dönüşümü sağlanamamıştır. Bu nedenle, yüksek özgül enerji tüketimi değerlerine ulaşılmıştır.

Motordaki efektif verimin, yükteki artışa paralel olarak yükseldiği tespit edilmiştir. Motorların optimum verimleri tam yük koşuluna göre ayarlandığından en yüksek efektif verim değerine tam yükte ulaşılmıştır. Dizel tek yakıtlı çalışma koşulunda, en yüksek efektif verim elde edilmekle birlikte bunu sırasıyla doğalgaz ve biyogazın takip ettiği görülmüştür. Yük artışı ile birlikte, gaz ve pilot yakıt miktarı da artmaktadır. Pilot yakıt miktarındaki bu artış ile tutuşma esnasında daha fazla enerji salınımı söz konusu olmakta ve enjektörden püskürtülen yakıtın karakteristiğinin (atomizasyonun ve yakıt hüzmesinin) iyileşmesine sebep olduğu değerlendirilmektedir. Bu durumun düşük alev hızı ve yüksek tutuşma sıcaklığına sahip gaz yakıtların efektif veriminin yükselmesine imkân tanıdığı tespit edilmiştir. Çift yakıtlı motor sistemlerinde bu verim değerini artırabilmek için,

motor avansının revize edilerek yeniden düzenlenmesinin mümkün olacağı düşünülmektedir. Ancak bu durumda çift yakıt sisteminin avantajları arasında gösterilen anlık yakıt değişim olanağının olumsuz yönde etkileneceği de unutulmamalıdır.

Dizel motorlarda daha yaygın olarak kullanılan yakıt eşdeğerlik oranı, bu çalışmada da göz önünde bulundurulmuştur. Kısılmaz bir hava akış ile çalışan dizel motorlarda emme havasına ilave edilen gaz yakıtlar, silindir içerisine gönderilen havayı ve dolayısıyla O_2 miktarını etkilemektedir. Bu durumda yük artışıyla birlikte silindir içerisine alınan hava miktarı azalmakta, hacimsel verim düşmekte bu da eksik yanma emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Emme sisteminde karıştırılmaya başlanan gaz ve hava ile her ne kadar homojen karışım sağlansa da, gazların (hava, doğalgaz ve biyogaz için) sahip olduğu farklı yoğunluk değerleri ve politropik indeksleri nedeniyle yanma odasında veya öncesinde hem homojenliğin bozulmasına hem de silindir içi sıcaklığın bu esnada düşmesine sebep olacağı düşünülmektedir.

Standart dizel çevriminde yanma “tutuşma gecikmesi”, “kontROLSÜZ yanma”, “kontrollü yanma” ve “gecikmiş yanma” evrelerinden meydana gelmektedir. Çift yakıt sisteminde ise bu evrelere ilave olarak gaz yakıtın varlığı nedeniyle ikinci bir “tutuşma gecikmesi” evresi daha eklenmektedir. Aynı avans değeri için bu durum yanmanın normal dizelden daha uzun bir süreye yayılmasına sebep olur. Bu ifadeler kullanılırken ana yakıt olan gaz, yakıtın kimyasal ve termodinamik özellikleri dikkate alınmamıştır. Ancak tutuşma sıcaklığı ve metan sayısı yüksek biyogazın ana yakıt olarak seçilmesi, yanma süresinin daha uzun olmasına neden olmaktadır.

Yanma reaksiyonlarına, silindir içerisindeki hava miktarının gaz yakıt miktarı kadar azalması da eklendiğinde, eksik yanmanın meydana gelmesi söz konusu olmaktadır. Ayrıca, yukarıda yer alan ifadelerde de belirtildiği gibi, homojenliğin bozulması, bölgesel fakir ve zengin karışımların oluşturduğu O_2 yetersizlikleri, pilot yakıt miktarının değişkenliği ve bölgesel alev sönmelerinin meydana gelmesi egzozda ölçülen CO emisyonunun yükselmesinin sebepleri olarak görülmektedir. Ayrıca biyogazın ihtiva ettiği % 40 oranındaki CO_2 gazı,

karbon atomlarının reaksiyon esnasında yeterince O_2 ile bağ yapamaması ile sonuçlanmıştır. Dolayısıyla hem yakıtın doğasından kaynaklanan, hem de çift yakıt sisteminden kaynaklı etkenler yanma reaksiyonundan kaynaklananlar ile birleşerek CO emisyonunun yükselmesine sebep olmaktadır.

Yapılan testlerde, motorun egzoz sistemine emisyon azaltıcı düzenek bağlanmamıştır. Rodyum, platin, paladyum ve bunların karışımı olan elementlerin katalist olarak kullanıldığı katalitik konvektörler vasıtasıyla ile CO ve HC emisyonları O_2 ile reaksiyona sokularak CO_2 ve H_2O oluşturularak emisyon giderimi kolaylıkla yapılmaktadır. Dolayısıyla çift yakıt sistemi ile biyogazın veya doğalgazın kullanılmasının planlandığı jeneratör motorlarının egzoz sistemine katalik konvertörler eklenerek, emisyon sorununun ortadan kaldırılabilceği değerlendirilmektedir.

Sıcaklık ve O_2 konsantrasyonu NO_x emisyonlarının oluşumuna etki eden en önemli iki faktördür. Yanma odası sıcaklığının $1600\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerine çıktığı durumlarda hava içerisinde bulunan azot molekülleri O_2 ile reaksiyona girerek NO_x emisyonunu oluşturmaktadır. Bu gazlar atmosferde doğal gaz çevrimine girerek, nitrik asit oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlar. Atmosferdeki nitrik asit oluşumu ise asit yağmurlarının oluşmasında etkilidir. Merkezi sinir sistemi ve akciğerlerdeki alveollerde irritasyona sebep olarak insan sağlığını da etkilemektedir.

Yapılan çalışma neticesinde biyogaz/dizel çift yakıtlısında, NO_x emisyonunun, herhangi bir ilave düzenek kullanılmadan (EGR vb.) % 50'ye varan oranlarda azaltılması sağlanmıştır. Biyogazın içeriğindeki CO_2 miktarı, emme zamanında silindir içerisine alınan havanın azalmasına dolayısıyla da O_2 konsantrasyonunun seyrelmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, biyogazın emme sistemine alınması ile çalışma akışkanının (dolgunun) spesifik ısı kapasitesi arttırılmakta ve böylece alev yayılımı yavaşlamaktadır. Bu katkı ile, yanma işlemi sırasında tepe yanma sıcaklığının düşürülmesi sağlanmaktadır.

Enerji maliyetlerine ilişkin yapılan kabullerle birlikte, deney verilerine bağlı hesaplamalarda çift yakıt sisteminin tek yakıtlı sisteme kıyasla büyük miktarda

tasarruf sağladığı görülmüştür. Tam yükte gaz yakıtların etkinliğinin artması ile maliyetlerin düşürülebileceği ortaya çıkarılmıştır. Biyogazın, performans ve emisyon testlerinin yanında maliyetler açısından da enerji dönüşümlerinde alternatif bir yakıt olduğu tespit edilmiştir. Normal şartlarda biyogazın üretiminde meydana gelen organik gübrenin de ticari değerinin olması, bu yakıtı daha cazip hale getirmektedir.

Özgül enerji tüketim maliyetleri açısından, çift yakıt sisteminin tek yakıt sistemine kıyasla tam yük altında % 50'nin üzerinde bir ekonomi sağladığı yapılan hesaplamalar ile ortaya çıkarılmıştır. Düşük ve orta yük kademelerinde doğalgazın daha avantajlı olduğu gözlenirken, tam yük koşulunda biyogazın daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Burada en önemli husus, biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı esnasında ihtiva edeceği H_2S miktarıdır. Çünkü yapılan tüm testler ve hesaplamalar, H_2S değerinin yüksekliğinin, biyogazın sağlayacağı tüm fayda ve kazanımların sürdürülür olmasının önündeki en büyük engel olacağını göstermektedir. H_2S 'in biyogazın yakıt olarak kullanımından önce çeşitli yöntemlerle arındırılmasının, sistemin tümüne büyük katkı sağlayacağı görülmüştür.

Tüm bu sonuçlara ilave olarak konuya ilişkin aşağıda yer alan öneriler sunulmuştur:

- Enerji maliyetleri, titreşim değerleri, gürültü emisyonları, yağ analizleri vb. farklı alanlarda benzer çalışmaların sayılarının artırılarak bilimsel altyapının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

- Farklı motor tip ve hacimlerinde bu testlerin tekrarlanması ile çift yakıt prosedürlerinin belirlenmesinin ve sonrasında ise uzun süreli kullanım testleri ile motor ömrüne etkilerinin ortaya çıkarılarak standartlarının tespit edilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

- Özellikle biyoyakıt temelli yapılan benzer çalışmaların sahaya yönelik uygulamalarına, devlet/özel kurumlarca destek ve teşviklerin sağlanmasının veya mevcut desteklerin kapsamına dahil edilmesinin alternatif yakıtların kullanımına ivme verebileceği değerlendirilmektedir.

- Biyogazın içeriğindeki H_2S 'in, motor ömründe çok önemli bir parametre olması sebebiyle biyogaz üretim tesislerinde elde edilen gazın kullanımından önce muhakkak suretle uzaklaştırılması veya 300 ppm'in altında tutulması önerilmektedir.

- Bu çalışmanın dışında, diğer alternatif ve yenilenebilir sıvı ve gaz yakıtların birbirleri ile çift yakıt sisteminde kullanımına ilişkin çalışmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

- Ülkemizde çok az bilinen ve tekil olarak sürdürülebilir olmayan yakıtların da enerji üretimine dâhil edilebilmesine olanak tanıyan çift yakıt sisteminin, ülke sanayisine ve tarımına iyi bir şekilde tanıtılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abuşoğlu, A., Demir, S. ve Konoğlu, M.,** 2013, Biyogaz beslemeli gaz motorlu bir kojenerasyon sisteminin termo ekonomik analizi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 33, 09-21.
- Acaroğlu, M.,** 2013, Alternatif Enerji Kaynakları, Nobel Yayınevi, Bölüm No:5.
- Acaroğlu, M.,** 2010, Yakıtlar ve Yanma, Nobel Yayınevi, Bölüm 3, 125-126.
- Aktaş, A. ve Doğan, O.,** 2010, Çift Yakıtlı bir dizel motorda LPG yüzdesinin performans ve egzoz emisyonlarına etkileri, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25-1, 171-178.
- Alisaraei, A.T., Ghobadian, B. And Hashjin, T.T.,** 2012, Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends, Fuel, 102, 414-422.
- Amell, A.,** 2007, Influence of altitude on the height of blue cone in a premixed flame, Applied Thermal Engineering, 27, 408-412.
- Amit P. and Abhishek T.,** 2013, An investigation of the combustion and emission characteristics of compression ignition engines in dual-fuel mode, Int. J. Adv. Res. Innovation, 3, 98–106.
- Anonim 1,** www.geohive.com/world_population.html (Erişim Tarihi 02.01.2012).
- Anonim 2,** <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx>
- Anonim 3,** <http://www.g-volution.co.uk/site/dualfuefficiency> Erişim tarihi: 18.01.2017.
- Anonim 4,**<http://www.southwestchptap.org/data/sites/1/events/2005-08-11/tower>.
- Anon 5,** https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_sulfur, erişim tarihi 24.12.2016.
- Anon 6,** <http://europa.eu/documentation/official-docs/green-papers/indexen.htm#2000>.
- Anonim 7,** http://www.biogasmax.eu/media/d3_8_new_lmcu_bgx_ue_standard_14_dec_10_vf_077238500_0948_26012011.pdf
- Anonim 8,** <http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E0b.htm>

- Anonim 1, 1999,** Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- Anonim 10,** www.geohive.com/GeoHive_Populationofcontinentsregionsandcountries/html (Erişim Tarihi, 02.01.2012).
- Anonim 11,** https://en.wikipedia.org/wiki/Bi-fuel_vehicle (Erişim Tarihi: 18.01.2017).
- Anonim 12, Aktacir, C., 2014,** Doğalgaz tesisatı ders notu.
- Anonim 13,** Hitit Üniversitesi, Deneysel çalışmalarda hata ve belirsizlik analizi.
- Arroya, J., Moreno, F., Monne, C. and Berral, N., 2014,** Combustion behavior of a spark ignition engine fueled with synthtetic gases derived from biogas, Fuel, 117, 50-58.
- Asan, H. ve Namlı L., 1997,** Deneysel ısı transferi ve basınç kaybı çalışmalarında belirsizlik analizi, ULIBIK.
- Asgari, M.J., Safavi, K. and Mortazainezahad, F., 2011,** Landfill biogas production process, International Conference on Food Engineering and Biotechnology, Singapore, 208-2012.
- Ashok, B., Ashok, S.D. and Kumar, C.R., 2015,** LPG diesel dual fuel engine-a critical review, Alexandria Engineering Journal, 54, 105-126.
- Asian NGV Communications, 2012,** Diesel to Gas Conversion Technologies, 59.
- Atmanlı, A., 2013,** Dizel motorunda dizel yakıtı-alkol-bitkisel yağ karışımları kullanımının motor karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi, doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD.
- Awasume, I.E. and Sathiyaraj, A.P.J., 2011,** Optimization of pre-hydrolysis condition fort he production of biogas, University of Boras Master Thesis.
- Aydın, İ., 2013,** Sayısal görüntü işleme ders notları, Fırat Üniversitesi, http://web.firat.edu.tr/iyaydin/bmu357/Bolum_1.pdf (Erişim tarihi: 23 Haziran 2017).
- Barden Precision Bearings, 2017,** Bearing failure: Caoses and cures, https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media

_library/01_publications/barden/brochure_2/downloads_24/barden_bearing_failures_us_en.pdf, erişim tarihi: 13.12.2017

Bari, S., 1996, Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel diesel-dual fuel engine, WREC, 1007-1010.

Barik, D. and Murugan, S., 2014, Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas-diesel in dual fuel mode, Energy, 72, 760-771.

Barut, E., 1997, Design and implementation of a distributive gas fuel metering system for the dual fuel operation of a diesel engine, in partial fulfillment of the requirements, Master Science, METU, Ankara.

Bedoya, I.D., Arrieta, A.A. and Cadavid, F.J., 2009, Effects of mixing system and pilot fuel quality on diesel-biogas dual fuel engine performance, Bioresource Technology, 100, 6624-6629.

Benz, W., 1985, (Gas Engine Handbook) and MWM Gasmotoren-Information (Gas Engine Information), Motorenwerke Mannheim, FRG, Gas Engines, KHD Deutz, Köln (Cologne), FRG.

Bilcan, A., Corre, O. L., Tazerout, M., Ramesh, A. and Ganesan, S., 2001, Characterization of the LPG – Diesel Dual Fuel Combustion, SAE 2001-28-0036.

Biomethane from Dairy Waste, 2005, A Sourcebook for the Production and Use of renewable Natural Gas in California, Chapter 5: Uses of Biogas and Biomethane, 81-106.

Bora, B.J., Saha, U.K., Chatterjee, S. and Veer, V., 2014, Effect of compression ratio on performance, combustion and emission characteristics of a dual fuel diesel engine run on raw biogas, Energy Conversion and Management, 87, 1000-1009.

BP Statistical Review, Ocak 2014, BP Energy Outlook 2035, Londra.

BP Statistical Review of World Energy Full Report, Haziran 2014.

BP Statistical Review of World Energy Full Report, Haziran 2011.

- Brealey, R.A., Myers, S.C. and Marcus, A.J.,** 1997, İşletme Finansının Temelleri, Mc Graw Hill, 147-149.
- Brigham, E.F.,** 1989, Finansal Yönetimin Temelleri, Cilt-1, Çeviri, Ankara Üniversitesi Rektörlüğü Yayınları No:206, 155-157.
- Bunakov, B.M., Grigor'ev, M.A., Chudinovskikh, A.L., and Belyanchikov, G.P.,** 1983, Corrosion of plain bearings in diesel engines, Plenum Publishing Corporation, 347-351.
- Cacua, K., Amell, A. and Cadavid, F.,** 2012, Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine, Biomass and Bioenergy, 45, 159-167.
- Calle, F.R., Groot, P., Hemstock, S.L. and Woods, J.,** 2007, The Biomass Assesment handbook, Earthscan Publication.
- Carlucci, A.P., Risi, A., Laforgia, D. and Naccarato, F.,** 2008, Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel-natural gas engine, Energy, 33, 256-263.
- Cartlidge, E.,** 2015, "Superconductivity record sparks wave of follow-up physics". Nature News.
- Caterpillar,** 2015, AMT-UK Test Report.
- Chandra, R., Vijay, V.K., Subbarao, P.M.V. and Khura, T.K.,** 2011, Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas, Applied Energy, 88, 3969-3977.
- Çallı, B.,** 2012, Atıklardan biyogaz üretimi, Türkiye Kimya Derneği, Genç Kimyacılar Platformu.
- Çelikkaya, H.,** 2016, Biyogaz, Fırat Kalkınma Ajansı Araştırma Raporu.
- Demirbaş, A. ve Öztürk, T.,** 2005, Anaerobik digestion of agricultural solid residues, Int J.Gren. Energy 1:483-494.
- Demirbaş, A.,** 2008, Biofuels, Green Energy and Technology, Springer, s.87-89.
- Deri, V. and Mancini, G.,** 1990, Development of medium-speed and high-speed diesel engines to burn natural gas, biogas and lean gas on stationary plants.SAE Paper no 905111.

- Deublein, D. and Steinhauser, A.,** 2008, Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Drapcho, C.M., Nhuan, N.P. and Walker, T.H.,** 2008, Biofuels engineering process technology, Mc Grae Hill publication.
- Dursun, S. ve Özdemir, Z.Ö.,** 2016, Anaerobik bakteriler kullanılarak atıklardan biyogaz üretimi, Kimya ve Sanayi, Türkiye Kimya Derneği, 2, 7-22.
- Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü,** 2016, Ege Üniversitesi Menemen Araştırma, Uygulama ve Üretim Çiftliği Biyogaz Tesisi Fizibilite Raporu.
- Ehsa, M.D. and Bhuiyen, S.,** 2010, Dual fuel performance of a small diesel engine for applications with less frequent load variations, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 9, 30-39.
- Ergenç A.T.,** 2009, Biodiesel yakıt ile çalışan motordaki püskürtmenin performans ve emisyon yönünden optimizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erken, N.,** 2008, Mikroboru akışkanlarındaki ölçüm belirsizlikleri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Erşan, K.,** 1987, Biyogazın içten yanmalı motorlarda kullanımı ve motor performansına etkisi, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi.
- Eryaşar, A.,** 2007, Kırsal kesime yönelik bir biyogaz sisteminin tasarımı, kurulumu, testi ve performansına etki eden parametrelerin araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Eryaşar, A. ve Koçar, G.,** 2009, Biyogaz üretiminde basıncın etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2, 181-186.
- Eryaşar, A., ve Koçar, G.,** 2009, Biyogazın mevcut ısıtma sistemlerinde kullanılabilme olanakları, Mühendis ve Makine, 50, 590, 10-16.
- European Commission,** Energy For The Future: Renewable Sources Of Energy, 1997, White Paper For A Community Strategy And Action Plan, COM(97) 599 Final.

- Felt, A.E. and Steele, W.A.**, 1962, Combustion control in dual-fuel engines, SAE Trans, 70, 644.
- Florez, J.A. and Egusquiza, E.**, 2015, Analysis of damage caused by siloxanes in stationary reciprocating internal combustion engines operating with landfill gas, Engineering Failure Analysis, 50, 29-38.
- Filho, A.R.**, 1992, Performance, consumption and emission with a otto engine, running with alternative fuel methane, SAE Paper no 921441.
- Finley, M.**, The Oil Market to 2030, Implications for Investment and Policy Economics of Energy & Environmental Policy, Vol. 1, No. 1, 2012.
- Ga, B.V., Nam, T.V. and Xuan, N.T.T.**, 2010, Utilization of biogas engines in rural area: A contribution to climate change mitigation, Colloque International Runsud, 19-31.
- Galal, M.G., Abdel, M.M. and Elkady, M.A.**, 2002, Comparative study between diesel and dual fuel engines: Performance and emissions, Combustion Science and Technology, 174, 241-256.
- Goldsworthy, L.**, 2012, Combustion behavior of a heavy duty common rail marine diesel engine fumigated with propane, Exp. Thermal Fluid Sci. 42, 93-106.
- Gomez-Montoya, J.P., Cacia-Madero, K.P., Iral-Galeano, L. and Amell-Arrieta, A.A.**, 2013, Effect of biogas enriched with hydrogen on the operation and performance of a diesel/biogas dual engine, Journal Ciencia Tecnologia Futuro, 5, 61-72.
- Gonzalez, C.D., Arrieta, A.A. and Suarez, J.L.**, 2009, Comparison of combustion properties of simulated biogas and methane, C.T.F. Cienc. Tecnol.Futuro, 3, 5, 225-236.
- Goto, S., Furuntai, H., Komorit, M. and Yagit, M.**, 1994, LPG diesel engine, International Journal of Vehicle Design, 15.
- Gökalp, B., Saraç, İ. ve Çelik, C.**, 2007, Yağ analiz programı ile aşınmaya bağlı hasar analizi, 8'inci Uluslararası Kırılma Konferansı, İstanbul, 651-664.

- Gül, E.**, 2011, Biyolojik proseslerle üretim yapan biyogaz tesisinin ve proses sonucu elde edilen biyogaz ile çalışan süt soğutma ünitesi tasarımı ve optimizasyonu, Ege Üniv. Bitirme Tezi.
- Hacisalihaoğlu, B.**, 2008, “Turkey’s Natural Gas Policy”, Energy Policy, No. 36, s 1867.
- Harmon, J.L., Svoronos, S.A., Lyberatos, G. and Chynoweth, D.P.**, 1993, Adaptive Temperature Optimization of Continuous Anaerobic Digesters, Biomass and Bioenergy, 5, 279-288.
- Henham, A. and Makkar, M.K.**, 1998, Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine, Energy Conversion and Management, 39, 2001-2009.
- Heywood, J. B.**, 1985, Internal Combustion Engine Fundamentals, USA: Mc Graw Hill, 490-685.
- Hideyuki O., Noboru M., Chenyu L., Satoshi N. and Keiichi A.**, 2001, Low emission and knock-free combustion with rich and lean biformal mixture in a Dual-Fuel CI engine with induced LPG as the main fuel. SAE 2001-01-3502.
- Holman, J. P.**, 1994, Experimental methods for engineers, New York: McGraw-Hill, 571-652.
- Huang, J. and Crookes, R.J.**, 1998, Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine, Fuel, 77, 1793-1801.
- Huguen, P. and Le Saux, G.**, 2010, Perspective of a European standard on biomethane; a biogas proposal, Lille Métropole Communauté Urbaine (LMCU).
- İstanbul Gaz Dağıtım Anonim Şirketi (İGDAŞ)**, 2017, Serbest tüketici doğalgaz satış tarifeleri, <http://www.igdas.istanbul/serbest-tuketici-satis/>, (erişim tarihi, 20 Ekim 2017).
- Intergovernmental panel on climate change (IPCC)**, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.
- International Energy Agency**, Key World Energy Statistics, 2011, p.40-41.

- International Energy Agency**, Key World Energy Statistics, 2014, p.40.
- International Energy Agency**, Energy Technology Perspectives 2010, Scenarios and Strategies.
- International Energy Agency Statistics**, 2013 Edition, CO₂ Emissions From Fuel Combustion Highlights.
- International Energy Agency Statistics**, 2011 Edition, CO₂ Emissions From Fuel Combustion Highlights.
- International Energy Agency (IEA)** Working Paper, 2011, Combining Bioenergy With CCS, Reporting and Accounting For Negative Emissions Under UNFCCC and The Kyoto Protocol, Paris.
- Intertek Caleb Brett**, 2016, Diesel fuel analytical report, İstanbul Tuzla Laboratuvarı.
- Jeong, C., Kim, T., Lee, K., Song, S. and Chun, K. M.**, 2009, Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 9620-9627.
- John, D.G.M. and Proakis, G.**, 2007, Digital Signal Processing, New Jersey: Prentice Hall.
- Kadayıfçılar, S. ve Acar, A.İ.**, 1992, Yakıtlar ve Yanma, Ziraat Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Kanit W.**, 2011, Visualization of LPG-PME dual fuel combustion in an IDI CI engine. The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering.
- Kantörün, U.**, 2010, Bölgesel enerji politikaları ve Türkiye, Bilge Strateji, Cilt 1, Sayı 3, s.75-97.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L. and Angelidaki, I.**, 2008, Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. Bioresource Technology, 99, 4919-28.
- Karagiannidis, A.**, 2012, Waste to Energy; Opportunities and Challenges for Developing and Transition Economies; Thessaloniki.

- Karanikar, S.R. and Supekar, D.S.,** 2015, Vibration analysis of four stroke diesel engine using FFT analyzer, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 6, 359-364.
- Karim, G.A.,** 1980, A review of combustion processes in the dual fuel engine the gas diesel engine, Progress in Energy and Combustion Science, 6, 277-285.
- Karim, G.A.,** 1983, The dual fuel engine of the compression ignition type-prospects, problems and solutions-A review, SAE Trans, Paper No 831073.
- Karim, G.A. and Wierzbe, I.,** 1983, Comparative studies of methane and propane as fuel for spark ignition and compression ignition engines, SAE Trans Paper No 831196.
- Karim, G.A. and Wierzba, I.,** 1992, Methane-carbon dioxide mixtures as a fuel. SAE Paper no 921557.
- Karim, G.E. and Zhaoda, Y.,** 1988, An analytical model for knock in dual fuel engines of the compression ignition type, SAE Paper No:880151.
- Karlsson, A., Björn, A., Yekta, S.S. and Svensson, B.H.,** 2014, Improvement of the biogas production process, Biogas Research Center (BRC) Report.
- Kawase, K., Okada, A. and Yamada, T.,** 2016, Development of the new Daihatsu 2MW Class dual-fuel engine for marine use, CIMAC Congress, Helsinki.
- Kelleci, B., Öner, M. ve Başaran H.,** 2014, Hızlı Fourier Dönüşümünün FPGA Uygulamasının SQNR Simülasyonu, ELECO 2014, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 559-563.
- Kesling, C.,** 2016, Detailed assessment of an advanced wide range diesel injector for dual fuel operation of large engines, CIMAC Congress, Helsinki, 3-17.
- Kim, M.,** 2005, Friction force measurement and analysis of rotating liner engine. Ph. D. Thesis, The University of Texas, Austin.
- Kline, S. J. and Mc Clintock, F. A.,** 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, Mechanical Engineering, 3-8.
- Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş., Bayrakçı, A.G. ve Aytav, E.,** 2013, Kırsal kesim biyogaz teknolojilerinin geliştirilmesi ve

yaygınlaştırılması, Devlet Planlama Teşkilatı GÜdümlü Teknoloji Geliştirme Projesi, Proje No: 07/DPT/003.

Koçar, G., Eryaşar, A., Aytav, E., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş., ve Bayrakçı, A.G., 2015, Biyogaz kullanımının içten yanmalı motorlarda, motor performansına etkileri, Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi.

Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş. ve Durmuş, A., 2010, Biyogaz Teknolojileri, Ege Üniversitesi Basımevi.

Kossmann, W. and Pöritz, U., 2011, Biogas Digest Volume I, Biogas Basics, 28.

Koten, H., Yılmaz, M. ve Gül, M.Z., 2014, Compressed biogas-diesel dual-fuel engine optimization study for ultralow emission, Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering, 1-8.

Kum, H., 2009, Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya piyasalarındaki son gelişmeler ve politikalar, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Sayı 33, s.207-223.

Kuhnke, J.F., 2008, Optimization of gas engines for the use of biogas, Deutz power systems, VDI-Berichte Nr, 2046.

Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M. and Hao, S., 2013, Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel fuel engine with optimized pilot injection timing, Applied Energy, 110, 201-206.

Luijten, C.M. and Kerkhof, E., 2011, Jatropa oil and biogas in a dual fuel CI engine for rural electrification, Energy Conversion and Management, 52, 1426-1438.

Luostarinen, S., Normak, A. and Edstrom, M., 2011, Overview of biogas technology, knowledge report, Baltic Manure Business Opportunities, 9-19.

Macari, N.C. and Richardson, R.D., 1987, Operation of a caterpillar 3516 spark-ignited engine on low-btu fuel. Journal of engineering for gas turbines and power, 109, 443-447.

Maciej, I., Andrzej P., Michal, S. and Slawomir, W., 2011, Choise of a pilot döşe in dual fuel self-ignition engine of a generator, depending on its load, Journal of KONES Power Train and Transport, 18, 129-136.

- Mahle**, 2017, Engine bearing: Failure analysis and correction, Technical information, <https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-north-america/product-files/ceb-2-1114-engine-bearing-failures-brochure.pdf>, erişim tarihi 22.11.2017.
- Makareviciene, V., Sendzikiene, E., Pukalskas, S., Pimkus, A. and Vegneris, R.**, 2013, Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation, *Energy Conversion and Management*, 75, 224-233.
- Mansour, C., Bounif, A., Aris, A. and Gaillard, F.**, 2001, Gas-diesel (dual fuel) modeling in diesel engine environment, *International Journal of Therm.Sci.*, 40, 409-424.
- Marchaim, U.**, 1992, Biogas Processes for Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN92-5-103126-6.
- Mavi Kitap**, 2011, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı İle Bağlı ve İlgili Kuruluşların Amaç ve Faaliyetleri, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yayını, s. 9 – 13.
- Mitzlaff, K.V.**, 1988, Energies for biogas, A Publication of the Deutsches Zentrum Für Entwicklungstechnologien, 24-42.
- Mueller, G.P.**, 1995, Landfill gas application development of the caterpillar G3600 spark-ignited gas engine. *Journal of engineering for gas turbine and power*, 117, 820-825.
- Müjdeci, S. ve Kaleli, H.**, 2010, Engine oil additives, their properties and interactions, *Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma*, 28, 138-149.
- Neyeloff, S. and Cunkel, W.W.**, 1981, Performance of a CFR engine burning simulated anaerobic digester's gas. *ASAE Publication*, 2, 324-329.
- Nwafor, O.M.I.**, 2001, Knock characteristics of dual-fuel combustion in diesel. *Sadhana*, 375–382.
- Nwafor, O.M.I.**, 2002, Lean-knock limits for dual-fuel combustion of natural gas in diesel engine, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 9 250-254.

- Oester, U. and Wallace, J.S.**, 1987, Liquid propane injection for diesel engines, SAE, 872095.
- Organisation For Economic Co-Operation And Development (OECD)**, 1999, Energy, The Next Fifty Years, France.
- Öztürk, E.**, 2011, İçten Yanmalı Motorlarda Titreşimlerin İncelenmesi, Doktora Tezi Gazi Üniversitesi, 51-52.
- Pal, A. and Tiwari, A.**, 2013, An investigation of the combustion and emission characteristics of compression ignition engines in dual fuel mode, International Journal of Advance Research and innovation, 3, 98-106.
- Plawsky J.L., Wang, F. and William N.G.**, 2002, Kinetic model for the pyrolysis of polysiloxane polymers to ceramic composites, AIChE J, 48, 10, 2315-2323.
- Pamir, N.**, 2003, “Dünya’da ve Türkiye’de enerji, türkiye’nin enerji kaynakları ve enerji tüketimi”, Metalurji Dergisi, s.12.
- Papagiannakis, R.G. and Hountalas, D.T.**, 2003, Experimental investigation concerning the effect of natural gaz percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine, Applied Thermal Engineering, 23, 353-365.
- Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T. and Rakopoulos, D.C.**, 2010, Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions, Fuel, 89, 1397-1406.
- Papagiannakis, R.G. and Hountalas, D.T.**, 2004, Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas, Energy Conversion and Management, 45, 2971-2987.
- Papacz, W.**, 2011, Biogas as Vehicles Fuel. J Kones Powertrain and Transport, 18, 403-11.
- Parawira, W.**, 2004, Anaerobic treatment of agricultural residues and wastewater application of high-rate reactors, doctoral dissertation, Lund University, Sweden.

- Park, C., Park, S., Lee, Y., Kim, C., Lee S. and Moriyoshi, Y.,** 2011, Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 10080-10088.
- Park, S.H., Yoon, S.H., Cha, J. and Chang S.L.,** 2014, Mixing effects of biogas and dimethyl ether (DME) on combustion and emission characteristics of DME fueled high-speed diesel engine, *Energy*, 66, 413-422.
- Petrol Ofisi,** 2017, Akaryakıt pompa fiyatları, <http://petrolofisi.com.tr/istasyonlar/akaryakit-pompa-fiyatlari>, (erişim zamanı, 20 Ekim 2017).
- Petrol Sanayi Derneği,** PETDER 2015 Sektör raporu, sayfa 36.
- Phan, M.D.,** 2007, Kanit Wattanavichien, Study on biogas premixed charge diesel dual fuelled engine, *Energy Conversion and Management*, 48, 2286-2308.
- Porpatham, E., Ramesh, A. and Nagalingam, B.,** 2008, Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used a fuel for a spark ignition engine, *Fuel*, 87, 1651-1659.
- Porpatham, E., Ramesh, A. and Nagalingam, B.,** 2013, Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Energy Conversion and Management*, 76, 463-471.
- Porpatham, E., Ramesh, A. and Nagalingam, B.,** 2007, Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2057-2065.
- Porpatham, E., Ramesh, A. and Nagalingam, B.,** 2012, Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine, *Fuel*, 95, 2012, 247-256.
- Poonia, P., Ramesh, M. and Guar, A.R.R.,** 1998, Effect of intake air temperature and pilot fuel quntity on the combustion characteristics of a LPG diesel dual fuel engine, *SAE Technical Paper Series*, 982455.
- Pound, B., Done, F. and Preston, T.R.,** 1981, Biogas Production from Mixtures of Cattle Slurry and Pressed Sugar Cane Stalk, With and Without Urea, *Trop. Anim. Prod.*, 6, 11-21.

- Rai, S.**, 2005, Domestic biogas for cooking and sanitation, Biogas Sector Partnership Nepal.
- Ram, M.S., Singh, L., Suryanarayana, M.V.S. and Alam, S.I.**, 2000, Effect of Iron, Nickel and Cobalt on Bacterial Activity and Dynamics During Anaerobic Oxidation of Organic Matter, *Water, Air, and Soil Pollution*, 117, pp. 305–312.
- Rama R. S.**, 2001, Experimental investigations on the performance of a lean burn spark ignited gas engine, Ph.D.Thesis, IC.Engines LAb, IIT Madras, Chennai.
- Rangwala, A.S.**, 2010, Reciprocating machinery Dynamics, New Age International Publishers, New Delhi, 162-165.
- Raubaud, A. and Favrat, D.**, 2005, Improving performance of a lean burn cogeneration biogas engine equipped with combustion prechambers, *Fuel*, 84, 2001-2007.
- Razbani, O., Mirzamohammad, N. and Assadi, M.**, 2011, Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines, Third International Conference on Applied Energy, İtalya.
- Roy, M.M., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y. and Sakane, A.**, 2010, An experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H₂ diesel dual fuel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 844-853.
- Rudnick, L.R.**, 2003, Lubricant additives: Chemistry and applications, The Energy Institute, University Park, USA.
- Ryu, K.**, 2013, Effects of the pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel, *Applied Energy*, 111, 721-730.
- Ryu, S., Yoon, H., Choe, H. and Choi, G.**, 2016, Development of HILS system for HIMSEN dual fuel engine, CIMAC Congress, Helsinki.
- Safgönül, B., Arslan, H.E., Ergeneman, M. ve Soruşbay, C.**, 2013, İçten Yanmalı Motorlar, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Sahoo, B.B., Sahoo, N. and Saha, U.K.,** 2009, Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—a critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1151–1184.
- Saikaly, K., Corre, O.Le, Rahmouni, C. And Truffet, L.,** 2010, Preventive knock protection technique for stationary SI engines fuelled by natural gas, 91, 641-652.
- Saleh, H.E.,** 2008, Effect of variation in LPG composition on emission and performance in a dual fuel diesel engine, *Fuel*, 87, 3031-3039.
- Saraç, S.,** 2011, Çift yakıtlı bir dizel motorda LPG/biyodizel oranının performans ve emisyonlara etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniv.
- Schiavon, M.A.,** 2002, Investigation on kinetics of thermal decomposition in polysiloxane networks used as precursors of silicon oxycarbide glasses, *J Non-Cryst Solids*, 304, 1, 92–100.
- Schmid, K.,** 2016, Cylinder Individual combustion control of gas and dual fuel engines, CIMAC Congress, Helsinki.
- Sadi, T.A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. and Janssen, R.,** 2008, *Biogas Handbook*.
- Seing H.Y. and Chang, S.L.,** 2011, Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine, *Fuel Processing Technology*, 92, 992-1000.
- Selçuk, I.Ş.,** 2010, Küresel ısınma, Türkiye'nin enerji güvenliği ve geleceğe yönelik enerji politikaları, Ankara Barosu Başkanlığı, Ankara Barosu Yayınları.
- Selim, Y.E.,** 2004, Sensitivity of dual fuel engine combustion and knocking limits to gaseous fuel composition, *Energy Convers. Manage.* 45, 411-425.
- Senghaas, C.,** 2016, Simplified L'Orange fuel injection system for dual fuel applications, 28th CIMAC World Congress, Helsinki.
- Senghaas, C., Wilmann, M. and Koch, H.J.,** 2016, Simplified L'Orange fuel injection system for dual fuel applications, 28th World CIMAC Congress, Helsinki.

- Sezgin, B.**, 2009, Bir dizel motorun doğalgaz ile çalışır hale getirilmesi ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi.
- Sichuan C.**, 1979, Biogas technology and utilization, Institute of Agricultural Machinery, Chengdu seminar, China.
- Simeonov, I., Denchev D. and Baykov, B.**, 2006, Development of new technologies for production of heat and electric power from organic wastes for increasing the economic efficiency of the final products”, Advances in Bulgarian Science, 15-24.
- Singiresu, S.R.**, 2011, Mechanical Vibrations 5th edition, Pearson Publication, 792-798.
- Siriparanakarachi, S. and Sucharitakul, T.**, 2007, Modification and tuning of diesel bus engine for biogas electricity production, Maejo International Journal of Science and Technology, 1, 194-207.
- Solmaz, H.**, 2014, Dört silindirli dört zamanlı bir dizel motorunun dinamik modeli ve titreşimlerin incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 5-10.
- Soylu, S.**, 2005, Prediction of knock limited operating conditions of a natural gas engine, Energy Conversion and Management, 46, 121-138.
- Subramanian, K.A.**, Mathad, V.C., Vijay, V.K. ve Subbarao, P.M.V., 2013, Comparative evaluation of emission and fuel economy of an automotive spark ignition vehicle fuelled with methane enriched biogas and CNG using chasis dynamometer, Applied Energy, 105, 17-29.
- Surata, I.W., Nindhia, T.G.T., Atmika, I.K.A., Negara, D.N.K.P. and Putra, I.W.E.P.**, 2014, Simple conversion method from gasoline to biogas fueled small engine to powered electric generator, Energy Procedia, 52, 626-632.
- Stolpp, S.**, European Biogas Association, www.european-biogas.eu (Erişim tarihi 22 Kasım 2016).
- Tanoue, K., Kido, H., Hamatake, T. and Shimada, F.**, 2000, Improving the turbulent combustion performance of lean methane mixture by hydrogen addition. FISITA World Automotive Congress, Seoul.
- Taylor, C.**, 1993, Engine Tribology. Elsevier Science Publishers, B.V.J.

- Thring, R.H.**, 1985, Alternative fuels for spark-ignition engines, SAE Paper no 831685.
- Tippayawong, N., Promwungkwa, A. and Rerkkriangkrai, P.**, 2007, Long term operation of a small biogas/diesel dual-fuel engine for on-farm electricity generation, Biosystem Engineering, 98, 26-32.
- Tippayawong, N., Promwungkwa, A. and Rerkkriangkrai, P.**, 2010, Durability of a small agricultural engine on biogas/diesel dual fuel operation, Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering, 34, 167-177.
- Tiwari, G.N., Usmani, J.A. and Chandra, A.**, 1996, Determination of Period for Biogas Production, Energy Convers. Mgmt, Vol.37, 2, 199-203.
- TS 7363 Türk Standartları Enstitüsü**, Doğalgaz-bina iç tesisat projelendirme ve uygulama kuralları, 2008.
- TS ISO 8528-9**, 2004, Gidip gelme hareketli içten yanmalı motorla tahrik edilen alternatif akım jeneratör grupları bölüm 9: Mekanik titreşimlerin ölçme ve değerlendirilmesi.
- TS EN ISO 11201**, 2001, Akustik- Makina ve donanım tarafından yayılan gürültü- Bir iş mahallinde ve belirtilen diğer konumlarda yayılan ses basınç seviyelerinin ölçülmesi-Esas olarak bir yansıtma düzlemi boyunca açık bir alanda kullanılan mühendislik metodu.
- Türkiye İstatistik Kurumu**, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist> (Erişim Tarihi: 22 Ocak 2017).
- Turpeinen, H.**, 2007, Innovating In Biofuels, Neste Oil, Workshop On Environmental Innovation and Global Markes, 20-21.
- Tutak, W. and Jamrozik, A.**, 2014, Generator gas as a fuel to power a diesel engine, Thermal Science, 18, 205-216.
- Türk Alman Biyogaz Derneği**, Üretimden kullanıma biyogaz kılavuzu, Türk-Alman Biyogaz Projesi, 2011.
- U.S. Energy Information Administration**, 2011, Annual Energy Outlook 2011, DOE/EIA-383.

- U.S. Energy Information Administration**, 2014, Annual Energy Outlook 2014, DOE/EIA-383.
- Uludamar, E., Tosun, E. and Aydın, K.**, 2016, Experimental and regression analysis of noise and vibration of a compression ignition engine fuelled with various biodiesels, *Fuel*, 177, 326-333.
- Ulukış, S.Y.**, 2010, Belirsizlik analizi ve bazı uygulamaları, Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 9-10.
- Wang, R.**, 2005, A Study of vibration of engine mount system, M.Sc. Thesis, Concordia Univesity, 33-38.
- Warnatz, J., Maas, U. and Dibble R. W.**, 2006, Combustion, Berlin: Springer-Verlag, 45-67.
- Wärtsilä Corporation**, 2009, Wärtsilä 50DF Engine Technology, Accessible on the internet at: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/productfiles/engines-generating-sets/dual-fuelengines/wartsila-o-e-w-50df-tr.pdf?sfvrsn=6>, Erişim tarihi: 2016-04-15.
- Wenxiu, T. and Mengjie, W.**, 1989, Experiment and Research on a Mesophilic Anaerobic Digester with Dairy Cattle Manure in Northern China, *Biomass*, 20, 41-52.
- Werner, U., Stöhr, U. and Hees, N.**, 1989, Biogas Plants in Animal Husbandry, A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, GATE, A Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Wierzbicki, S., Pietak, A., Imiolek, M. and Imiolek, A.**, 2012, Dual-fuelled compression ignition engine with methane and diesel oil, *Research Papers of Aleksandras Stulginskis University*, 44, 211-222.
- Wierzbicki, S.**, 2011, Effect of the parameters of pilot dose injection in a dual fuel diesel engine on the combustion process, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 18, 499-506.
- Willmann, M., Senghaas, C. and Schmidt, R.M.**, 2014, New Generation DUAL FUEL Injection Systems, 6th AVL Large Engines TechDays, Graz.

- World Energy Council**, European Climate Change Policy Beyond 2012, 2009, WEC.
- World Energy Council**, Global Transport Scenarios 2050, 2011, IBM Corporation, Paul Scherrer Institute.
- World Energy Council**, 2010, Pursuing Sustainability: 2010 Assessment of Country Energy and Climate Policies.
- Wu, H.W., Wang, R.H., Chen, Y.C., Ou, D.J. and Chen T.Y.**, 2014, Influence of port-inducted ethanol or gasoline on combustion and emission of a closed cycle diesel engine, *Energy*, 64, 259-267.
- Wunsche, A.G.**, 1985, High speed engines for gaseous fuels as power modules in total energy plants. CIMAC international congress on combustion engines, Oslo.
- Yadvika, S., Sreekrishnan, T., Kohli, S. and Rana, V.**, 2004, Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques-a review. *Bioresource Technology*, 95, 1-10.
- Yılmaz, A. ve Atalay, H.**, 2004, “Çeşitli organik katı atıkların anaerobik fermantasyonu ve modelleme çalışmaları”, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 619-626.
- Yiğit, A.**, 2008, Bir dizel motorda LPG kullanılması ve farklı özellikteki pilot dizel yakıtının motor performans ve emisyonuna etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniv.
- Yoon, S.H. and Lee, C.S.**, 2011, Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine, *Fuel Processing Technology*, 92, 992-1000.
- Zulkifli, N.W.M., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Shahabuddin, M. and Yunus, R.**, 2013, Wear prevention characteristics of a palm oil-based TMP (trimethylolpropane) ester as an engine lubricant, *Energy*, 54, 167-173.

ÖZGEÇMİŞ

Emre AYTAV, 30 Ocak 1980 tarihinde Balıkesir'in Bandırma ilçesinde dünyaya gelmiştir. İlk ve orta öğrenimini Bandırma'da tamamlamıştır. 1994-1997 yılları arasında K.K. Teknik Astsubay Hazırlama Okulu'nda öğrenim görmüş ve okul birincisi olarak mezun olmuştur. Üniversite eğitimini 1997-2001 yılları arasında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Öğretmenliği'nde özel onur listesine girerek tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2002-2005 yılları arasında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitiminde bitirmiştir. 2014 yılında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliğini tamamlayarak Makine Mühendisi ünvanını almıştır. 2001-2015 yılları arasında 14 yıl süre ile K.K. Astsubay Meslek Yüksek Okulu'nda Otomotiv Grup Başkanlığında öğretim görevlisi olarak görev yapmıştır. 2015-2017 yılları arasında K.K.K.lığı Harekât Başkanlığında görev yapmıştır. Halen Millî Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu Dekanlığında öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır. İngilizce bilmektedir.

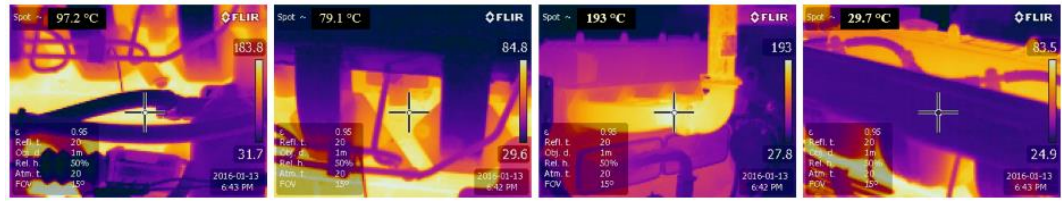
EKLER

Ek 1 Termal görüntü kayıtları.

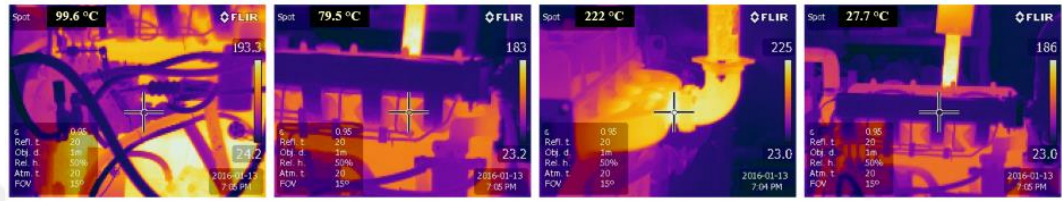


EK-1

Dizel Tek Yakıtlı – 5 kW



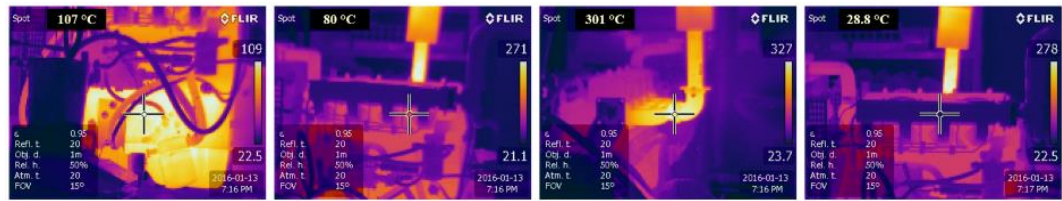
Dizel Tek Yakıtlı – 10 kW



Dizel Tek Yakıtlı – 15 kW



Dizel Tek Yakıtlı – 20 kW

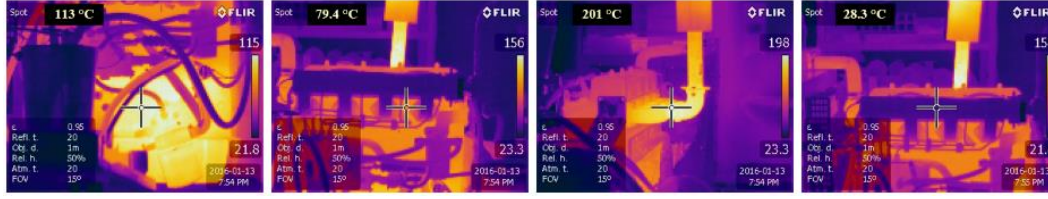


Dizel Tek Yakıtlı – 25 kW

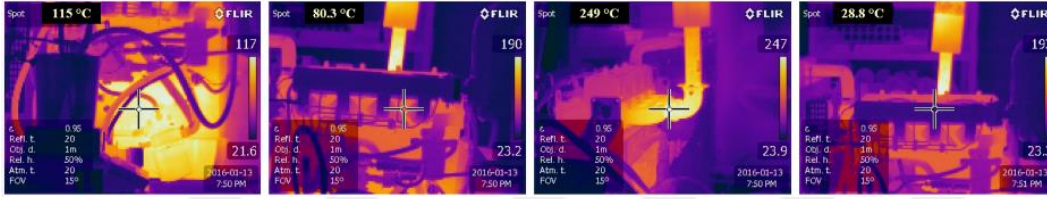


EK-1 (Devam)

Doğalgaz/Dizel Çift Yakıtlı – 5 kW



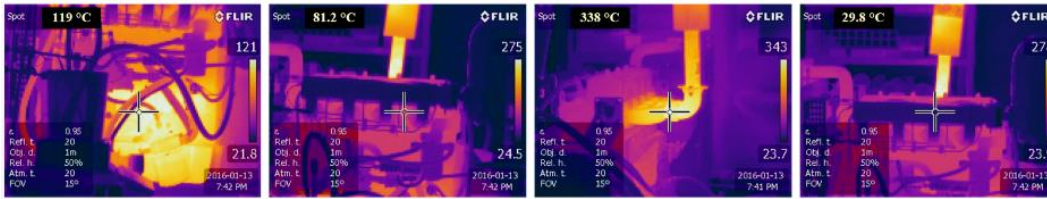
Doğalgaz/Dizel Çift Yakıtlı – 10 kW



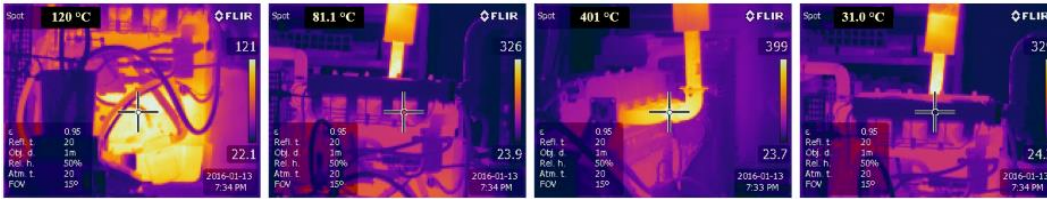
Doğalgaz/Dizel Çift Yakıtlı – 15 kW



Doğalgaz/Dizel Çift Yakıtlı – 20 kW

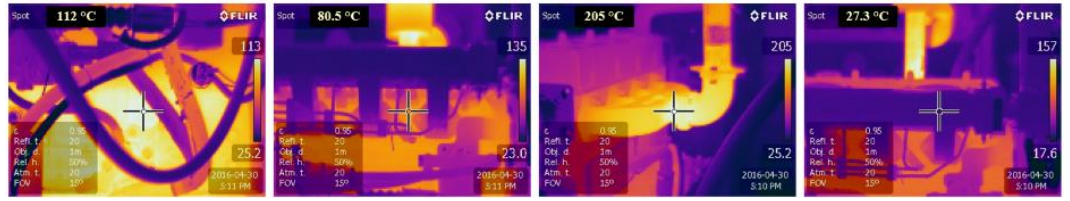


Doğalgaz/Dizel Çift Yakıtlı – 25 kW

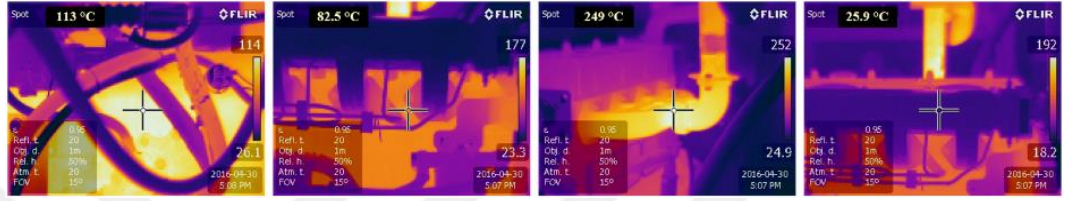


EK-1 (Devam)

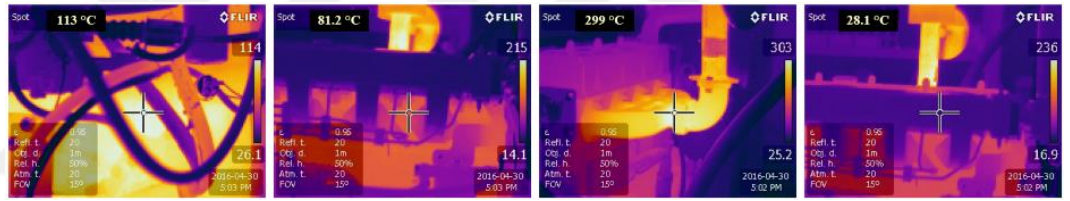
Biyogaz/Dizel Çift Yakıtlı – 5 kW



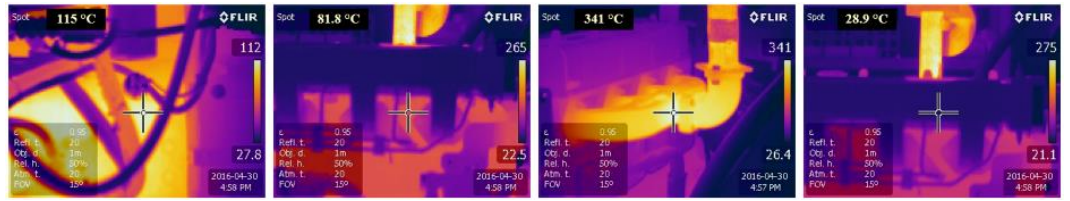
Biyogaz/Dizel Çift Yakıtlı – 10 kW



Biyogaz/Dizel Çift Yakıtlı – 15 kW



Biyogaz/Dizel Çift Yakıtlı – 20 kW



Biyogaz/Dizel Çift Yakıtlı – 25 kW

