



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİYOĞAZ YAKITLI DİZEL MOTORDA PİLOT YAKIT MİKTARININ EMİSYONLAR ÜZERİNE ETKİSİ

MUSTAFA YAVUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Metin Gümüş

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İlker Turgut Yılmaz

İSTANBUL, 2019



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



BİYOĞAZ YAKITLI DİZEL MOTORDA PİLOT YAKIT MİKTARININ EMİSYONLAR ÜZERİNE ETKİSİ

MUSTAFA YAVUZ

523216003

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Metin Gümüş

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İlker Turgut Yılmaz

İSTANBUL, 2019

MARMARA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa YAVUZ'un
"Biyogaz yakıtlı dizel motorda pilot yakıt miktarının emisyonlar üzerine etkisi" başlıklı
tez çalışması, 29.08.2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı/başarısız
bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Metin Gümüş (Danışman)

Marmara Üniversitesi



Doç.Dr. Mustafa Yılmaz (Üye)

Marmara Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Demirci (Üye)

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

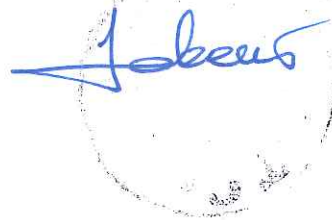


ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararı ile Mustafa YAVUZ'un Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine
Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ



TEŞEKKÜR

Her geçen gün artış gösteren dünya nüfusuna paralel olarak artan araç sayısının sebep olduğu sera etkisi, zararlı egzoz emisyonları vb. olaylar insan sağlığını tehdit etmektedir. Gerek temiz bir çevre talebi, gerekse ekonomik arayışlar ve sınırlı petrol kaynakları, alternatif yakıt bulma çabalarına hız kazandırmıştır.

Bu tez çalışmasında, çift yakıtlı bir motorda ana yakıt olarak biyogaz pilot yakıt olarak ise dizel yakıt kullanılarak zararlı egzoz emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma boyunca deneyler Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Motor Test ve Ölçüm Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Bu tez çalışmasında emeği olan danışmanım Prof. Dr. Metin Gümüş'e, eş danışmanlığımı yapan ve her an yanımda olan ve yardımlarını sonuna kadar hissettiğim Dr. Öğretim Üyesi İlker Turgut Yılmaz'a ve tez izleme jüri üyeleri Doç. Dr. Mustafa Yılmaz ile Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Demirci'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi-manevi her anlamda yanımda olan ve beni her zaman destekleyen anneme teşekkür ederim.

En büyük teşekkürüm ise kendisinin oğlu olduğum için her zaman gurur duyduğum, bu tez çalışmasında çok büyük emekleri olan ve tezi bitirmem için gün sayan ama bu günleri göremeden vefat eden canım babama. Emeklerin için çok teşekkür ederim. Biliyorum ki hala yanımdasın. Rahat uyu.

Ağustos, 2019

Mustafa YAVUZ

İÇİNDEKİLER

SAYFA

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
SEMBOLLER.....	viii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
TABLO LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Biyogaz ve Özellikleri	3
1.2.1. Biyogazın elde edilmesi	4
1.2.1.1. Ülkelere göre biyogaz kullanımı	4
1.2.1.2. Biyogazın kullanım alanları	5
1.2.2. Biyogaz yakıtlı içten yanmalı motorlar	5
1.2.2.1. Buji ateşlemeli motorlarda biyogaz kullanımı.....	6
1.2.2.2. Biyogazın sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılması	6
1.2.2.3. Çift yakıtlı motorlarda püskürtme avansı ve miktarının etkileri	7

1.3. Dizel Yakıt ve Özellikleri	7
1.3.1. Dizel yakıtın sınıflandırılması	8
1.3.2. Dizel yakıtının özellikleri.....	8
1.3.2.1. Viskozite.....	8
1.3.2.2. Bulutlanma ve akma noktası	9
1.3.2.3. Alevlenme ve parlama noktası.....	9
1.3.2.4. Uçuculuk noktası	9
1.3.2.5. Donma noktası	9
1.3.2.6. Özgül ağırlık	10
1.3.2.7. Setan sayısı	10
1.3.2.8. Isıl değer	10
1.3.2.9. Kükürt miktarı	10
1.3.2.10. Kül miktarı.....	10
1.4. Dizel Motorlarda Çift Yakıt Uygulamaları.....	11
1.5. Günümüze Kadar Yapılan Bazı Çalışmalar	12
2. MATERYAL VE YÖNTEM	17
2.1. Deney Düzeneği	17
2.1.1. Deney motoru	18

2.1.2. Dinamometre	19
2.1.3. Hava yakıt ölçüm sistemleri.....	19
2.1.4. Emisyon ölçüm sistemi	20
2.2. Deney Sonuçlarının İncelenmesinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri	21
2.2.1. Özgül yakıt tüketimi	21
2.2.2. Özgül enerji tüketimi	22
2.2.3. Hacimsel verim.....	22
2.2.4. Isıl verim	23
2.2.5. Egzoz emisyonlarının hesaplanması.....	23
2.2.6. Hata analizi.....	24
2.3. Deney Yöntemi	24
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	26
3.1. Özgül Yakıt Tüketimi	26
3.2. Özgül Enerji Tüketimi	28
3.3. Hacimsel Verim	29
3.4. Isıl Verim	31
3.5. Egzoz Gazı Sıcaklıkları	33
3.6. Silindir İçi Sıcaklıklar.....	35
3.7. Egzoz Emisyonları	39
3.7.1. Hidrokarbon (HC) emisyonları	39
3.7.2. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları.....	41
3.7.3 Azot oksit (NO _x) emisyonları.....	43
3.7.4 İs emisyonları	45

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
4.1. Sonuçlar	47
4.2. Öneriler	49
KAYNAKLAR	50
EKLER.....	57



ÖZET

BİYOĞAZ YAKITLI DİZEL MOTORDA PİLOT YAKIT MİKTARININ EMİSYONLAR ÜZERİNE ETKİSİ

Son yıllarda umut verici bir enerji kaynağı olarak ön plana çıkan biyogaz, bilindiği gibi, biyokütleden anaerobik sindirim yoluyla, organik yakıtlardan elde edilmektedir. Her ne kadar üretim sürecine, hammaddelerin türlerine ve bileşimlerine bağlı olarak değişen ana bileşimi söz konusu olsa da, genellikle metan (CH_4) (%40-75), karbondioksit (CO_2) (%25-55), az olarak da hidrojen (H_2), hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer gazlardan oluşur. Araç yakıtları için petrole alternatif yakıt olabileceği görüldüğünden, birçok bilimsel çalışmanın konusu olmuştur.

Bu tez çalışmasında, biyogazın çift yakıtlı bir motorda kullanılmasıyla meydana gelen zararlı emisyonların (CO , HC , NO_x ve is) yansıra özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi, hacimsel verim, ısı verim ve egzoz gaz sıcaklıkları gibi parametreler incelenmiştir. %60'ı CH_4 , %40'ı ise CO_2 gazlarından oluşturulan biyogaz, ana yakıt kaynağı olarak kullanılmış, pilot yakıt olarak dizel yakıtı, biyogaz/hava karışımının tutuşturulabilmesi için motora gönderilmiştir. Deneylerde, Common-rail püskürtme sistemli, dört zamanlı, dört silindirli ve turbo şarjlı bir dizel motor kullanılmıştır. Çalışma boyunca motor, maksimum motor yüküne ulaştığı devir olan 1750 d/d'de sabit tutularak, 20 Nm aralıklarla 40-80 Nm arasında değiştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre çift yakıtlı çalışmada en uygun şartın pilot yakıt miktarının %50 olduğu görülmüştür.

ABSTRACT

EFFECT OF PILOT FUEL AMOUNT ON EMISSIONS OF BIOGAS FUELLED DIESEL ENGINE

Biogas, which has come to the forefront as a hopeful energy source in recent years, is derived from organic fuels through anaerobic digestion from biomass, as is known.

Although main composition varies depending on production process, types and compositions of raw materials, it is usually composed of methane (CH_4) (40-75%), carbon dioxide (CO_2) (25-55%), also a little bit hydrogen (H_2), hydrogen sulphide (H_2S) and other gases. Since it appears to be alternative fuel to oil for vehicle fuels, it has been the subject of many scientific studies.

In this thesis not only the harmful emissions CO , HC , NO_x and Soot but also parameters as specific fuel consumption, specific energy consumption, volumetric efficiency, thermal efficiency and exhaust gas temperatures by using biogas in a dual fuel engine are investigated. Biogas, which has been consist of 60% CH_4 and 40% CO_2 gases, have been used as a main fuel source and the diesel fuel as pilot fuel has been sent to the engine to ignite the biogas/air mixture. A diesel engine with a common-rail injection system, four- stroke, four-cylinder and turbocharged has been used in tests, the engine has been kept constant at 1750 rpm, the speed at which the highest torque was generated, and the torque has been changed between 40-80 Nm at 20 Nm intervals. According to test results, the optimum conditions are provided when the pilot fuel amount is 50% in the dual fuel operation.

SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece

K: Kelvin

KMA: Krank mili açısı

ϕ_h : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

ϕ_y : Yakıt yoğunluğu (kg/m^3)

μm : Mikro metre

d_p/d_a : Basınç artış hızı

EP: Özgül emisyon üretimi (g/kWh)

EV: Egzoz bileşeninin egzoz gazı içerisindeki hacimsel değeri (ppm)

$\dot{m}_{ex}$: Egzoz gazı kütleli debisi (kg/h)

$\dot{m}_{hgercek}$: Gerçek havanın kütleli debisi (kg/h)

$\dot{m}_{ht}$: Teorik havanın kütleli debisi (kg/h)

$\dot{m}_y$: Yakıtın kütleli debisi (kg/h)

M_{ex}: Egzoz gazı mol kütlesi (g/mol)

M_i: Egzoz bileşeni mol kütlesi (g/mol)

η_{th} : Isıl verim (%)

η_v : Hacimsel verim (%)

n: Motor devri (d/d)

P_e: Motor gücü (kW)

$\dot{Q}_h$: Yakıt enerjisi miktarı (kW)

V_s: Strok hacmi (m^3)

V_y: Yakıt hacmi (l)

$\dot{W}_{net}$: Birim zamanda yapılan iş (kW)

KISALTMALAR

ASTM: Amerika Malzeme Tecrübeler Kurumu

BG+D20: %20 pilot yakıt + %80 biyogaz

BG+D30: %30 pilot yakıt + %70 biyogaz

BG+D40: %40 pilot yakıt + %60 biyogaz

BG+D50: %50 pilot yakıt + %50 biyogaz

CH₄: Metan gazı

C_xH_y: Dizel yakıtı

CO: Karbon monoksit

CO₂: Karbondioksit

CHP: Birleşik ısı ve güç

CNG: Sıkıştırılmış doğalgaz

EGR: Egzoz gazı geri çevrimi

H₂: Hidrojen gazı

H₂O: Su buharı

H₂S: Hidrojen sülfür

H₂SO₄: Hidrojen sülfat

HC: Hidrokarbon

HCCI: Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli

HFK: Hava fazlalık katsayısı

İYM: İçten yanmalı motor

LHV: Yakıtın alt ısı değeri

LPG: Sıvılaştırılmış petrol gazı

N₂: Nitrojen

NO_x: Azot oksit

O₂: Oksijen gazı

ÖET: Özgöl enerji tüketimi

ÖYT: Özgöl yakıt tüketimi

ppm: Milyonda bir

SO₂: Kükürt dioksit

SO₃: Kükürt trioksit

t: Zaman

ÜÖN: Üst ölü nokta

z: Silindir sayısı



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Biyogazın oluşum şeması ...	4
Şekil 2.1. Deney düzeneği şeması	17
Şekil 2.2. Deney düzeneği.....	18
Şekil 2.3. Gaz tüpleri	19
Şekil 2.4. Bosch is ölçüm cihazı.....	21
Şekil 3.1. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ÖYT değerleri.	26
Şekil 3.2. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ÖET değerleri.	28
Şekil 3.3. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan hacimsel verim değerleri.	30
Şekil 3.4. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ısı verim değerleri.	32
Şekil 3.5. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla ölçülen en yüksek egzoz gazı sıcaklıkları değerleri.	34
Şekil 3.6. 40 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar	36
Şekil 3.7. 60 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar	37
Şekil 3.8. 80 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar	38
Şekil 3.9. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen HC emisyonu değerleri.	40
Şekil 3.10. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen CO ₂ emisyonu değerleri.	41
Şekil 3.11. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen NO _x emisyonu değerleri.	43
Şekil 3.12. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen is emisyonu değerleri.	45

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Biyogaz bileşenleri .	3
Tablo 1.2. Biyogaz, LPG ve CNG yakıtlarına ait bazı özellikler.	3
Tablo 1.3. Dizel yakıt sınıflarına ait özellikler .	8
Tablo 1.4. Dizel yakıt özellikleri	11
Tablo 2.1. Deney motorunun genel özellikleri	18
Tablo 2.2. Deneyde kullanılan akış metrelerin özellikleri.....	20
Tablo 2.3. Emisyon cihazına ait özellikler	20
Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan yakıt oranları	24

1. GİRİŞ

Hızla çoğalan dünya nüfusu, ihtiyaçların da artmasını beraberinde getirmekte ve buna bağlı olarak endüstrileşme de hızla gelişmektedir. Motorlu araçların çevresel problemler konusunda masum olmadıkları bilinen bir gerçektir. Nüfusun artmasına paralel olarak artış gösteren araç sayısının sebep olduğu sera etkisi, asit yağmurları vb. gibi olaylar dolaylı ya da doğrudan, insan sağlığını tehdit etmektedir [1]. Bu tehditler, ülkemizin de dahil olduğu pek çok ülkede egzoz gazı emisyon ölçümlerini yasal zorunluluk haline getirmiştir. Araç motorlarında yapılan önemli değişiklikler ve emisyon iyileştirme yöntemleri, zararlı egzoz gazlarının azalmasına olanak sağlamasına rağmen, sürekli artan araç sayısı nedeniyle, çevreye salınan zararlı gazların miktarlarında azalma meydana gelmemiştir. Gerek temiz bir çevre talebi gerekse ekonomik arayışlar ve sınırlı petrol kaynakları, alternatif yakıt bulma çabalarına hız kazandırmıştır [2].

İçten yanmalı motorlarda (İYM) alternatif enerji kaynaklarının kullanılması her geçen gün daha fazla ilgi çekmektedir. Gaz yakıtlar en önemli alternatif enerji kaynakları arasında gösterilebilir. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), hidrojen (H_2) ve biyogaz önde gelen gaz yakıtları arasındadır. Yakıt olarak LPG'nin kullanıldığı uygulamalarda yakıt ekonomisi ile birlikte zararlı emisyonlar için önemli iyileştirmeler görülmesine rağmen, LPG'nin fosil kökenli bir yakıt olması, fosil kökenli yakıtların çevreye olumsuz etkileri, stoklarının tükenmesi ve sınırlı kaynaklara sahip olması LPG için de endişeleri arttırmaktadır. H_2 'nin İYM'de yakıt olarak kullanıldığı çalışmalarda azot oksit (NO_x) dışında zararlı emisyon üretmediği görülmüştür. Buna rağmen, üretim yöntemlerinin pahalı olması H_2 'nin yakıt olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır. CNG'nin ise İYM'de yaygın olarak kullanılmasına rağmen rezervlerinin sınırlı olması dezavantajdır [3].

Yakıt olarak kullanılabilen biyogaz ise, içeriğindeki yüksek karbondioksit (CO_2) bileşeninden dolayı düşük alev yayılma hızına, düşük hacimsel enerji yoğunluğuna ve daha düşük yanıcılık limitlerine sahiptir. Biyogaz, buji ateşlemeli bir motorda yakıt olarak kullanıldığında tutuşma sıcaklığı yüksek olduğu için vurutuyu engelleyebilir. Sahip olduğu yüksek tutuşma sıcaklığından dolayı sıkıştırma ateşlemeli motorlarda doğrudan kullanılabilir [4].

1.1. Çalışmanın Amacı

Biyoyakıtlar olarak bilinen biyo-kütle bazlı alternatif yakıtların fosil yakıtlara göre birçok avantajı vardır. Kolay olarak elde edilebilmeleri, sera gazı emisyonlarını azaltma gibi özellikleri avantajlarından bazıları olarak sayılabilir. Biyodizel, biyoalkol ve biyogaz en yaygın olarak kullanılan yenilenebilir alternatif yakıtlardır [5].

Biyogaz, biyo-kütleden anaerobik sindirim yoluyla elde edilen umut verici bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Ana bileşimi, sindirim sürecine, hammaddelerin türlerine ve bileşimlerine bağlı olarak değişmesine rağmen, genellikle metan (CH_4) (%40-75), CO_2 (%25-55), az olarak da hidrojen (H_2), hidrojen sülfür (H_2S) ve diğer gazlardan oluşur. Biyogaz uygun bir şekilde kullanıldığında, İYM'ler için iyi bir alternatif yakıt olabileceği düşünülmektedir [6].

En önemli yenilenebilir alternatif yakıtlardan birisi olarak bilinen biyogazın çift yakıtlı bir motorda kullanılmasıyla motor performansının ve emisyonlarının incelenmesi bu tez çalışmasının amacını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada dizel yakıt ve biyogaz enerji kaynakları olarak kullanılmışlardır. Laboratuvar ortamında oluşturulan biyogazın, %60'ı CH_4 , %40'ı ise CO_2 gazlarından meydana gelmektedir. Biyogaz/hava karışımının tutuşturulabilmesi için motora pilot yakıt olarak dizel yakıt gönderilmiştir. Biyogaz, turbo doldurucu ile emme manifoldu arasına yerleştirilmiş bir karışım odasından sürekli olarak silindirlere gönderilmiştir. Dizel yakıt ise, klasik bir sıkıştırma ile ateşlemeli motordaki püskürtme işlemine benzer şekilde doğrudan silindir içerisinde sıkıştırılmış biyogaz-hava dolgusunun üzerine püskürtülmüştür. Hava/yakıt oranının makul seviyelerde tutulabilmesi ve hacimsel verimin iyileştirilebilmesi için deneylerde turbo dolduruculu motor kullanılmıştır. Pilot yakıt miktarı, motorun ihtiyaç duyduğu enerjinin %20'si ile %50'sini karşılayabilecek şekilde %10'luk artışlarla motora gönderilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda yakıt/hava karışımının tutuşması için az miktarda pilot yakıt kullanılması gereklidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, pilot yakıt oranının arttırılmasının yakıtın püskürtme zamanlamasını ve çift yakıtlı motorun düşük yük performansını iyileştirmek için önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür [7-8]. Ayrıca pilot yakıt oranının arttırılmasıyla motorda oluşan karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir [9].

1.2. Biyogaz ve Özellikleri

İçeriğinde büyük oranda CH_4 ile CO_2 ve az miktarda da H_2 ile diğer gazlar bulunan biyogaz, anaerobik bakteriler tarafından biyokütlenin fermentasyonundan üretilen renksiz, kokusuz ve havadan hafif bir gazdır. Biyogaz, organik atıklardan, bazı bitkilerden, evsel ve endüstriyel atıklardan üretilir [10].

Biyogazın özellikleri, İYM'lerde yaygın olarak kullanılan doğalgazın özelliklerinden farklıdır. Biyogazdaki CO_2 oranının yüksek olması, doğalgaza kıyasla düşük alev yayılma hızına ve aynı zamanda da dar bir yanma aralığına neden olur. Bundan dolayı biyogaz yakıtlı İYM'ler, düşük ısı verime sahiptirler ve aynı zamanda yüksek seviyelerde HC emisyonu üretirler [11].

Tablo 1.1'de biyogaz bileşenleri gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Biyogaz Bileşenleri [12].

Bileşen	Sembol	Yüzde (%)
Metan	CH_4	40-75
Karbondiyoksit	CO_2	25-55
Hidrojen	H_2	5-10
Nitrojen	N_2	1-2
Su Buharı	H_2O	0.3

Tablo 1.2'de biyogaz, LPG ve CNG yakıtlarına ait bazı özellikler gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Biyogaz, LPG ve CNG yakıtlarına ait bazı özellikler.

Özellik	Birim	Biyogaz	LPG	CNG
Molekül Ağırlığı	kg/mol	27,2	53,5	16,4
Tutuşma Limitleri	%	7,5-14	1,5-9,6	5-15
Yoğunluk	kg/m ³	1,2	2	0,58
Oktan Sayısı	-	130	92-110	120
Hacimsel Isıl Değer	MJ/m ³	20-27	25,4	36,14
Kütleli Isıl Değer	MJ/kg	17	46,23	46-49

1.2.1. Biyogazın elde edilmesi

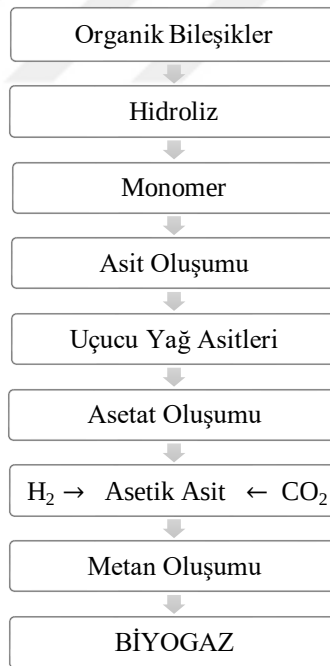
Biyogaz sırasıyla, hidroliz, asit oluşumu ve metan oluşumu olmak üzere üç evreden oluşur.

Hidroliz evresi ilk aşama olup bu evrede, mikroorganizmalar tarafından salgılanan selüler enzimler ile çözünür halde bulunmayan maddeler, çamur içerisinde çözünebilir hale gelirler. Uzun zincirli kompleks karbonhidratları, proteinleri, yağları ve lipidleri kısa zincirli yapılara dönüştürürler. Hidroliz aşaması asit oluşturma ve metan oluşumu evresinden daha hızlı şekilde gerçekleşir [13].

Asit oluşturma evresinde, alkoller ve uçucu yağ asitleri, hidrojen üreten anaerobik bakteriler tarafından asetik asit, H_2 ve CO_2 'ye dönüştürülür [14].

Metan oluşumu aşamasında, CH_4 , önceki aşamaların ürünleri olan asetik asit, H_2 ve CO_2 substratlar tarafından üretilir. Bu aşamada üretilen CH_4 'ün sadece %30'u ototrofik CH_4 bakterileri tarafından üretilen CO_2 'nin azaltılmasından kaynaklanmaktadır [15].

Şekil 1.1'de biyogazın oluşum şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Biyogazın oluşum şeması [16].

1.2.1.1. Ülkelere göre biyogaz kullanımı

Ülkeler sürdürülebilir kalkınmayı ve yeterli enerji tedarikini sağlamak için yeni metotlar tasarlarken, bazı zorluklarla da karşı karşıya kalmaktadırlar. Dolayısıyla, enerji

kaynaklarının, enerji tedarikinin ve talebinin uzun vadeli stratejik planlamalarının acil bir şekilde yapılması gerektiği açık hale gelmiştir [17].

Birçok Avrupa ülkesi, farklı üretim yöntemleriyle elde ettikleri biyogazı kendi enerji sektörlerine entegre etmeyi başarmışlardır. Biyogazdan yıllık enerji üretimi, Almanya'da 42 TWh, İngiltere'de 9 TWh ve Fransa'da 2,8 TWh'dır. Almanya, Avrupa Birliği'ndeki en yüksek üretim payına sahiptir. Bu ülkeler genel olarak biyogazı elektrik üretimi için kullanılmaktadırlar. Biyogazdan yaklaşık 1,7 TWh enerji üreten İsveç, bu üretiminin %44'ünü araç yakıtı olarak kullanmıştır. İtalya'da biyogaz, ağırlıklı olarak enerji üretimi için kullanılırken, birleşik ısı ve güç (Combined Heat and Power -CHP) gibi diğer yöntemler daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadır [18].

1.2.1.2. Biyogazın kullanım alanları

Biyogazın kullanılabileceği alanlar, içerdiği CH_4 ve CO_2 oranlarına göre belirlenmektedir. Biyogazın alt ısı değeri, içeriğinde bulunan CH_4 miktarına göre ortalama olarak 20-27 MJ/m³ arasında değişmektedir. CH_4 'ün standart basınç ve sıcaklıkta (1.013 bar, 0 °C) hacimsel olarak alt ısı değeri 36 MJ/m³, yoğunluğu ise 0,72 kg/m³'dür. Kütesel olarak ise alt ısı değeri 50 MJ/kg'dır. Sahip olduğu bu özellikleriyle birlikte biyogaz, içeriğinde bulunan CH_4 oranına bağlı olarak, evlerde ısıtma, aydınlatma gibi ihtiyaçların yanı sıra araçlarda da yakıt olarak kullanılabilir [19].

CH_4 , biyogazın en önemli bileşenidir ve üretilen biyogazın kalitesinde önemli rol oynar. Biyogaz çok düşük setan sayısı ve yüksek oktan sayısı nedeniyle bazı değişiklikler yapılmaksızın sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda doğrudan kullanılamaz. Biyogazın tutuşturulabilmesi için motorun yakıt sistemi değiştirilerek sisteme buji entegre edilebilir ya da çift yakıtlı sistem uygulanabilir [20].

1.2.2. Biyogaz yakıtlı içten yanmalı motorlar

İYM'lerde saatte 1 kW enerji elde edilebilmesi için yaklaşık olarak 0,45-0,8 m³ biyogaza ihtiyaç duyulmaktadır. Biyogazın İYM'ler de yakıt olarak kullanıldığı çalışmalarda, sistemin güvenliği dolayısıyla, hızlı kapama vanası, emniyet vanası, çift cidarlı gaz borusu, gaz kontrol pompası, ek pompa muhafazası ve gaz vanası kullanılması gerekmektedir. CH_4 'ün avantajları arasında, tam yanma, yağlama yağlarının özelliklerini bozmama ve vuruntuya neden olmaması sayılabilir. Bu

özellikler, biyogazın İYM’lerde yakıt olarak kullanıldığında motorun geniş bir sıkıştırma oranı aralığında vuruntusuz çalıştırılabileceği anlamına gelir [21].

1.2.2.1. Buji ateşlemeli motorlarda biyogaz kullanımı

Buji ateşlemeli bir motorda yakıt olarak biyogaz hiçbir dönüşüme ihtiyaç duymadan doğrudan kullanılabilir [22]. CO₂’nin ortadan kaldırılması, alevlenme limitlerini ve alev yayılma hızını iyileştirir. Dolayısıyla, ısı verim yükselir ve emisyonlar düşer. CO₂’nin giderilmesi, genellikle şehirlerde, kentsel atık kullanan büyük biyogaz tesislerinde yapılabilir. Buna ek olarak, biyogaz kullanılan motorlarda CO₂ ortadan kaldırıldığında, NO_x emisyonlarını kontrol altına almaya özen gösterilmelidir [23].

1.2.2.2. Biyogazın sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılması

İçeriğinde bulunan CO₂ bileşeni biyogazın sıkıştırma ile ateşlemeli motorda kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Biyogazın yakıt olarak kullanılabilmesi için içeriğindeki CO₂ miktarının makul oranlara düşürülmesi gerekmektedir. Temiz bir gaz yakıt olarak bilinen biyogaz, özellikle CO₂, H₂S ve su buharı gibi gazlardan arındırıldığında temiz yanmaya neden olur ve motor yağı kirliliğinin azaltılmasını sağlar [24].

Biyogaz, sıkıştırma ile ateşlemeli motorda çift yakıtlı olarak ya da tek yakıtlı olmak üzere iki farklı yöntemle kullanılabilir. Biyogaz kullanılan çift yakıtlı sıkıştırma ile ateşlemeli motorda motor performansı iyileşme gösterir. Çift yakıtlı çalışma sırasında biyogaz, emme zamanı sırasında emme kanalı vasıtasıyla veya direkt silindir içerisine püskürtme yöntemi ile motora gönderilebilir. Biyogaz/hava karışımının yanmasını başlatmak için dizel yakıt, sıkıştırma işleminin sonuna doğru silindir içerisine püskürtülür. Bu yöntemde, motorda önemli bir değişikliğe ihtiyaç duyulmamaktadır. Biyogaz eksikliğinde ya da biyogazın bulunmadığı durumda, sıkıştırma ile ateşlemeli motor kolayca tek yakıtlı çalışmada dizel yakıtıyla çalıştırılabilir. Tek yakıt olarak biyogazın kullanılması durumunda, sıkıştırma ile ateşlemeli motorun buji ateşlemeli motora dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm için, yakıt enjektörü yerine buji yerleştirilebilir. Bu yöntemin en büyük zayıflığı, dönüştürülmüş bir sıkıştırma ile ateşlemeli motorun sadece dizel yakıtla çalışacak duruma kolayca dönüştürülememesidir [25].

1.2.2.3. Çift yakıtlı motorlarda püskürtme avansı ve miktarının etkileri

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorda, püskürtme avansının ve miktarının yanma karakteristikleri üzerine önemli etkileri vardır. Ayrıca, püskürtme avansı ve miktarı motorun emisyon karakteristiklerinin belirlenmesinde de önemli rol oynar.

Yakıtın enjektörden çıkması ile ilk alev çekirdeğinin oluşması arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılır. Tutuşma gecikmesi, püskürtme avansı ve püskürtme basıncından doğrudan etkilenmektedir. Erken püskürtme, motor vuruntusunu etkileyen tutuşma gecikmesinin uzamasına neden olur. Geç püskürtme ise yanma sonunu geciktirerek yüksek ısı kaybına ve düşük ortalama efektif basınçlara sebep olmaktadır [26].

Bu parametreler için optimum şartların belirlenmesi ile hem yakıt ekonomisi sağlanırken hem de zararlı egzoz emisyonları azaltılabilmektedir. Püskürtmenin zamanlanması hava-yakıt karışımının kalitesini ve zararlı emisyonları da kapsayan yanma olayını etkilemektedir. Gecikmiş püskürtmenin maksimum silindir basınçlarını, ısı transfer hızlarını ve yanma gürültüsünü azalttığı bilinmektedir. Ayrıca, gecikmiş püskürtme silindir içi sıcaklıkları düşüreceğinden NO_x emisyonlarını azaltırken, yakıt tüketiminin ve is emisyonlarının artışına neden olacaktır [27].

Ön karışimli yanma esnasında, tutuşma gecikmesi sürecinde püskürtülen yakıt, ani olarak yanar. Bu ani yanma basınç artış hızını ($dp/d\alpha$) hızlı bir şekilde arttırarak, yanma odasındaki sıcaklığı başlangıçta oldukça yükseltir ve NO_x oluşumu için gerekli sınır koşullarını oluşturur. Bundan dolayı tutuşma gecikmesini kısaltmak NO_x oluşumunun önlenmesine neden olabilir. Tutuşma gecikmesinin kısaltılması ise ana püskürtme başlamadan önce ön püskürtme adı verilen az miktardaki yakıtın püskürtülmesi ile mümkündür. Ön püskürtme metodu ile önceden püskürtülen az miktardaki yakıt çabuk bir şekilde buharlaşarak, tutuşma reaksiyonlarını hızlandırır. Bu reaksiyonlardan dolayı yanma odası önceden hazırlanmış olur ve ana püskürtmenin tutuşma süresi kısalır. Bu yöntemle birlikte NO_x emisyonlarının belirgin bir şekilde azaltılması mümkündür [28].

1.3. Dizel Yakıt ve Özellikleri

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorda yakıt, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru silindir içi sıcaklıkların yaklaşık 700-800 °K olduğu durumda yanma odasına püskürtülür. Yakıtın kendi kendine tutuşma özelliği çok önemlidir. Yakıtın kendi kendine tutuşabilirliği

setan sayısı ile gösterilir. Türkiye’de mazot olarak adlandırılan dizel yakıtı, karbon sayısı 8 ila 16 arasında değişen sıvı HC bileşenlerin yanı sıra az miktarda kükürt, azot, kül ve su ihtiva eden bir karışımdır [29].

1.3.1. Dizel yakıtın sınıflandırılması

Amerika Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials - ASTM) standartlarına göre dizel yakıtlar üç derecede sınıflandırılmaktadır;

- No.1-D: Petrolün damıtılmasından elde edilerek, hız ve yüklerde sık sık değişiklik gereken motorlarda kullanılır.
- No.2-D: Ağır yüklerde düzenli hızda çalışan yüksek devirli motorlarda kullanılır.
- No.4-D: Çok koyu damıtma ve bazı benzin atıklarından oluşan düşük veya orta hız motorlarında kullanılan dizel yakıtıdır [30].

Tablo 1.3’de bu dizel yakıtlara ait özellikler gösterilmektedir.

Tablo 1.3. Dizel yakıt sınıflarına ait özellikler [31].

Özellikler	1-D Yakıtlar	2-D Yakıtlar	4-D Yakıtlar
Minimum Setan Sayısı	40	40	40
Alevlenme (Parlama) Noktası (°C)	37.78	51.67	54.44
Viskozite (37.78 °C) (Saybolt(s.))	30-34	33-45	45-125
Kül Oranı (Kütleli %)	0.01	0.02	0.1
Kükürt Oranı (Kütleli %)	0.5	1	2

1.3.2. Dizel yakıtının özellikleri

Dizel motorlarda yakıt püskürtme sistemlerinin uzun ömürlü olması ve iyi bir yanma sağlaması için, bazı özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler aşağıda anlatılmıştır [32].

1.3.2.1. Viskozite

Sıvıların akmaya karşı gösterdiği direnç viskozite olarak bilinmektedir. Birim uzaklıktaki iki düzlem arasındaki 1 m² alanlı sıvı tabakasını 1 m/s hızla kaydırmak için gerekli olan kuvvet dinamik viskozite olarak bilinmektedir. Dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ise kinematik viskozite olarak tanımlanır. Viskozitenin küçülmesi

silindirlere enjekte edilen yakıtın daha küçük parçalar haline gelmesini sağlayarak daha düzgün bir yanmanın gerçekleşmesine neden olur [33].

1.3.2.2. Bulutlanma ve akma noktası

Bulutlanma noktası, yakıtın soğumaya başladığı ve küçük katı parçaların görünür hale gelmesiyle kristalleşmenin başladığı sıcaklıktır. Akma noktası ise, yakıtın yarı katı hale geldiği en düşük sıcaklıktır. Yakıt, akış karakteristiklerini bu sıcaklıktan itibaren kaybetmeye başlar. Akma noktası sıcaklığı, bulutlanma noktası sıcaklığından daima daha düşüktür [34].

1.3.2.3. Alevlenme ve parlama noktası

Yakıtın parlama noktası, yakıtın güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli bir özelliktir. Parlama noktası, ısıtılan bir yakıtta alev yaklaştırıldığında alev çekirdeğinin oluşup söndüğü minimum sıcaklık olarak tanımlanabilir. Dizel yakıtın parlama noktasının düşük olması araçların çarpışması esnasında yakıt tankının patlama riskini artırır [35].

Alevlenme noktası ise buharın tutuşmaya başladığı en düşük sıcaklıktır. Alevlenme sıcaklığının parlama sıcaklığına kıyasla biraz daha yüksek olduğu bilinmektedir [36].

1.3.2.4. Uçuculuk noktası

Uçuculuk, dizel motorlardaki yakıtın yanması, çalışmayı kolaylaştırması ve dumansız bir yanmayı sağlaması için gerekli olan karışımın elde edilebilmesi konularında önem arz eden fiziksel bir özelliktir. Fakat yakıt ne kadar çabuk buharlaşırsa, kendi kendine tutuşma özelliği o kadar kötüleşir ve is oluşumu artar [37].

1.3.2.5. Donma noktası

Çapı en az 0,5 μm olan katı kristallerinin olduğu sıcaklık olarak tanımlanan donma noktası, yakıtın soğuk havalarda kullanılabilme kabiliyetini gösterir. Kristalleşmeye başlayan yakıt, yakıt sistemini tıkararak motor problemlerinin meydana gelmesine neden olur. Donma noktasının ortam sıcaklığından 5–10 °C daha düşük olması beklenir [38].

1.3.2.6. Özgöl ağırlık

Özgöl ağırlık, dizel yakıtın en önemli özelliklerinden birisidir. Bir yakıtın özgöl ağırlığı, ısı değeri, viskozite ve setan sayısı gibi yakıt karakteristiğinde önemli bir yeri bulunan özelliklerin bulunmasında kullanılır. Dizel yakıtın özgöl ağırlığı 0,815 ila 0,934 kg/L arasındadır [39].

1.3.2.7. Setan sayısı

Dizel yakıt için en önemli özelliklerden birisi olan setan sayısı, tutuşma gecikme süresinin genel bir göstergesi olarak tanımlanabilir. Yakıt kalitesinde ya da performansında önemli bir rol oynayan setan sayısının yüksek olması daha kısa bir tutuşma gecikmesi sağlamaktadır. Yüksek setan sayısına sahip olan yakıtın tutuşma eğilimi yüksek demektir [40].

1.3.2.8. Isıl değeri

Bir yakıtın ısı değeri, yanma sonucu sabit basınçta ve standart koşullar altında (0 °C 1.013 bar) üretilen ısı miktarıdır. Birimi kJ/kg ya da kcal/kg'dır. Dizel yakıtın alt ısı değeri 42,5 MJ/kg'dır [41].

1.3.2.9. Kükürt miktarı

Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarının çok yüksek olması istenmeyen bir durumdur. Ancak, emme ve egzoz sisteminde oluşan aşınmanın temel sebebi olan kükürt bileşenlerinin, üretimdeki oranını sıfıra düşürmek mümkün değildir. Dizel yakıt içerisinde bulunan kükürt, yanma esnasında oksijenle birleşerek kükürt dioksit (SO_2) ya da biraz daha oksijen ile kükürt trioksit (SO_3) oluşturur. Bu gazlardan SO_3 gazı H_2O ile birleştiğinde sülfirik asit (H_2SO_4) oluşturur. H_2SO_4 , çok şiddetli bir aşındırıcı olduğundan, motor parçalarının aşınmasına neden olur [42].

1.3.2.10. Kül miktarı

Yanma sonunda yanma odasında biriken karbon ve kül dizel yakıtın problemlerinden birisidir. Yanma esnasında, içerisinde bulunan metal oksitler (vanadyum, nikel, silisyum, demir oksit, vb.) karbonat ve sülfat tuzlarına dönüşürler. Setan sayısının artması belli bir değere kadar yakıtta bulunan kül miktarına olumlu etki ederken sonrasında is emisyonları üretmesine neden olmaktadır. Yakıtın kül bırakma oranı en fazla %0.01 olmalıdır [43].

Dizel yakıtı aitt bazı özellikler Tablo 1.4.'de verilmiştir.

Tablo 1.4. Dizel yakıt özellikleri [44].

Özellik	Dizel Yakıt
Kimyasal Formül	C_xH_y
Molekül Ağırlığı (kmol/kg)	190-220
Yoğunluk (kg/L)	~0,84
Viskozite (cP)	2,6
Kükürt İçeriği (ppm)	~250
Kaynama Noktası (°C)	180-360
Alevlenme Noktası (°C)	55
Tutuşma Sıcaklığı (°C)	315
Akma Noktası (°C)	-1,1
Havadaki Tutuşma Aralığı (%)	0,6-6,5
Stokiyometrik Hava-Yakıt Oranı (H/Y) _s	14,6
Buharlaştırma Gizli Isısı (kJ/kg)	250
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	42,5
Setan Sayısı	40-55

1.4. Dizel Motorlarda Çift Yakıt Uygulamaları

Çift yakıtlı bir motorda, biyogaz ve havadan oluşan dolgunun sıkıştırılmasından sonra, pilot yakıt olarak adlandırılan dizel yakıt silindir içine püskürtülür. Bu püskürtülen pilot yakıt, kendiliğinden tutuşur ve gaz yakıt için ateşleme kaynağı olur. Çift yakıtlı motorların temel avantajı, motor modifikasyonları olmaksızın, çok çeşitli gaz yakıtları ile çalışabilmeleridir. Bununla birlikte, yüksek miktarda HC, karbon monoksit (CO) ve NO_x emisyonları üretirler. Özellikle düşük yüklerde HC üretimi daha belirgindir. Buna ek olarak, çift yakıtlı motorlarda pilot dizel yakıt miktarı, yüke göre kontrol edilmelidir. Bunun nedeni motora püskürtülen pilot dizel yakıt miktarının tutuşma gecikmesinde önemli bir rol oynamasından kaynaklanmaktadır [45].

1.5. Günümüze Kadar Yapılan Bazı Çalışmalar

Bugüne kadar çift yakıtlı motorlarda ana yakıt olarak alternatif gaz yakıtların, pilot yakıt olarak ise sıvı yakıtların kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde, çift yakıtlı ve gaz yakıtlı motorlarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait literatür taraması yapılmıştır.

Mohamed İbrahim ve arkadaşları, çalışmalarında, emme manifolduna biyogaz gönderdikleri tek silindirli, Common-Rail direkt püskürtmeli bir sıkıştırma ile ateşlemeli motor kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada yazarlar, biyogaz-dizel ön karışimli çalışma ile çift yakıtlı çalışmada elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Ayrıca, 18,5 sıkıştırma oranlı, çift silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, Common-Rail direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ile ateşlemeli motoru, tek silindirle çalışacak hale getirmişlerdir. Bu işlem, diğer silindirin piston biyel mekanizmasını çıkartarak ve aynı zamanda emme ve egzoz yuvalarını kapatarak gerçekleştirilmiştir. Bir eddy current dinamometre, motor yükünü ve devrini kontrol etmek için kullanılmıştır. Tüm deneyleri, 1800 d/d'da ve 70 °C'lik soğutma sıvısı sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin sonucunda ön karışimli biyogaz-dizel çalışmada elde edilen ısı verim, HC ve NO_x emisyonları biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmaya göre iyileşmiştir. Ön karışimli çalışma için optimum püskürtme zamanları, ÜÖN'den 55-70° KMA önce ve optimum emme hava sıcaklığı 50-90 °C aralığında bulunmuştur. Yanma kontrolünün sağlanabilmesi için dizel yakıtın püskürtülmesiyle belirlenen 0,4 MPa üzerindeki ortalama efektif basınca, vuruntu ve alev sönme sınırları nedeniyle ulaşmak mümkün olmamıştır. Ön karışimli çalışma için en iyi biyogaz oranının %80 olduğunu ve bu durumda is seviyelerinin çift yakıtlı çalışma ile kıyaslanabileceğini ortaya koymuşlardır. Genel olarak ön karışimli çalışmada, ana yakıt olarak biyogaz-dizel kullanılması, motorun çalıştırılması için uygundur. Yüksek biyogaz oranlarında, biyogaz-dizel ön karışım modunun performans ve emisyonlarının, çift yakıtlı çalışmaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir [46].

Debabrata B. ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, direkt enjeksiyonlu, biyogaz-dizel çift yakıtlı bir motorun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneylerde, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı ve sıkıştırma oranı 17,5 olan bir sıkıştırma ile ateşlemeli motor kullanmışlardır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorun püskürtme zamanı ÜÖN'den önce, 23° KMA'dan 27,5° KMA'ya

kadar 1,5° KMA arttırılarak emisyonlar ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde, çift yakıtlı çalışmada pilot püskürtme, ÜÖN'den 26° KMA önce yapıldığında özgül yakıt tüketimi (ÖYT), tek yakıtla gerçekleştirilen deneyde elde edilen ÖYT'den yaklaşık %25 daha fazla olmuştur. Egzoz gazı sıcaklıkları ve ısı verim sonuçları incelendiğinde, motor yükü arttıkça egzoz gazı sıcaklıkları ile ısı verim değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çift yakıtlı çalışmada pilot püskürtme ÜÖN'den 26° KMA önce yapıldığında maksimum ısı verim %28,1 değerinde elde edilmiştir. Egzoz gazı sıcaklıklarının ise, motor yükü arttıkça yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Emisyonlar için en iyi sonuçların püskürtmenin ÜÖN'den 26° KMA önce yapılmasıyla elde edildiğini belirlemişlerdir. Tam yüklü deneylerde, HC ve CO emisyonlarının dizel yakıtlı çalışmaya göre, sırasıyla %10 ve %2 daha fazla olduğu görülmüştür. İS emisyonunun ise, çift yakıtlı çalışmada %39 daha düşük olduğunu bulmuşlardır. NO_x emisyonu, tek yakıtlı çalışmaya kıyasla, çift yakıtlı çalışmada pilot püskürtmenin ÜÖN'den 26° KMA önce yapılmasıyla %16 daha düşük çıkmıştır [47].

Huang Z. ve arkadaşları pilot püskürtme ve egzoz gazı çevriminin (EGR), homojen karışimli sıkıştırma ile ateşlemeli (homogeneous charge compression ignition-HCCI) bir motordaki yanma ve egzoz emisyonları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında Common-Rail püskürtme sistemiyle çalışan, turbo şarjlı, dört silindirli, dört zamanlı bir sıkıştırma ile ateşlemeli motor kullanmışlardır. Bu çalışma sonucunda yazarlar, ÖYT'nin pilot yakıt miktarının artışıyla doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, pilot yakıt miktarı arttırıldığında NO_x miktarının azaldığını, ancak belli bir değerden sonra arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durum, HCCI yanma sırasında NO_x'in azalması ile difüzyon kontrollü yanma sırasında NO_x'in artışı arasındaki dengeleme ilişkisinden kaynaklanmaktadır. HCCI fazında yanan pilot yakıt miktarı, NO_x emisyonlarını azaltmaktadır. Bununla birlikte, pilot yakıt miktarının daha fazla artması halinde, difüzyon kontrollü yanma fazının başlangıcındaki sıcaklıklar yükselir ve NO_x oluşumu artar. Ayrıca yazarlar, pilot yakıt miktarı arttıkça HC, CO ve is emisyonlarının arttığını da gözlemlemişlerdir. Miktarı artan pilot yakıtın, silindir içerisindeki kullanılabilir oksijen miktarını azaltması ve ana püskürtmede silindir içerisine gönderilen dizel yakıtın karışım oluşturma süresinin azalması, is emisyonlarını arttırmaktadır. HCCI yöntemi ile yanmanın tamamlanamaması, HC ve CO emisyonlarını arttırmaktadır. Dizel yakıtın silindir duvarlarına çarpması da HC ve CO

emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, EGR uygulamasında yakıt tüketimi az miktarda artarken, NO_x emisyonları önemli derecede azalmıştır [48].

Himsar Ambarita yaptığı çalışmada maksimum gücü 4,86 kW olan sıkıştırma ile ateşlemeli bir motor kullanmıştır. Bu motor herhangi bir değişim yapılmaksızın dizel-biyogaz yakıtlarıyla çift yakıtlı olarak çalıştırılarak test edilmiştir. Çalışmanın amacı, çift yakıtlı olarak çalıştırılan sıkıştırma ile ateşlemeli motorun performans ve emisyonuna biyogaz akış hızının ve CH₄ miktarının etkilerini incelemektir. Deneyler sırasında, motor gücü 600 W ile 1500 W arasında, devir ise 1000 d/d ile 1500 d/d arasında değiştirilmiştir. Deney motoru, tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı, sıkıştırma oranı 23 olan bir sıkıştırma ile ateşlemeli motordur. Bu motor, önce tek yakıtlı olarak ardından ise çift yakıtlı olarak çalıştırılarak sonuçlar karşılaştırılmışlardır. Tek yakıtlı çalışmada, motor farklı devirlerde ve motor gücünde test edilerek, elektrik çıkış gücü ve yakıt tüketimi ölçülmüştür. Çift yakıtlı çalışmada ise, temiz havayı biyogazla karıştırmak için bir gaz karıştırıcı tank geliştirilmiş ve tasarlanmıştır. Tanktaki biyogaz, emme manifolduna doğru akarak, temiz hava ile karışmıştır. Biyogaz içeriğinde bulunan CH₄ yoğunluğu ve akış hızı değiştirilerek, farklı devirlerde ve motor gücünde test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ise, motor gücü arttıkça ısı veriminde arttığını gözlemlemiştir. ÖYT hesaplandığında ise, tüm motor yüklerinde çift yakıtlı çalışma ile elde edilen sonuçların, sadece dizel yakıt ile elde edilen sonuçlardan yüksek çıktığını belirtmiştir. CO emisyonu, tek yakıtlı çalışmada çift yakıtlı çalışmaya kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu durum, dizel yakıtın alev yayılma hızının, biyogaza göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. CO emisyonunda olduğu gibi HC emisyonu da tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmada daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, biyogazın akış hızı arttıkça HC emisyonunda da artış gözlemlenmiştir [49].

Debabrata Barik ve Murugan Sivalingam direkt püskürtmeli bir dizel motorda ana yakıt olarak biyogaz, pilot yakıt olarak ise dizel yakıt kullanarak motoru çift yakıtlı çalıştırmışlardır. Yazarlar bu çalışmada motorun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerini çift yakıtlı çalışmayla tek yakıtlı çalışmayla karşılaştırarak incelemişlerdir. Deneylerde, biyogaz dört farklı akış hızında (0,3 kg/sa, 0,6 kg/sa, 0,9 kg/sa, 1,2 kg/sa) emme manifolduna püskürtülmüştür. Deneylerde tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı, sıkıştırma oranı 17,5 olan direkt püskürtmeli bir sıkıştırma ile ateşlemeli motor kullanmışlardır. Deneyler boyunca motor devri 1500 d/d'de sabit

tutulmuştur. Emisyon sonuçları incelendiğinde, CO emisyonunun tam yükte 1,2 kg/h akış hızında, çift yakıtla gerçekleştirilen çalışmada tek yakıtlı çalışmaya kıyasla %24 daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. Debinin 0,9 kg/h olduğu durumda ise, CO emisyonu çift yakıtlı çalışmada tek yakıtlı çalışmaya göre %17 artış göstermiştir. HC emisyonunun ise biyogazın akış hızının 1,2 kg/h olduğu durumda, çift yakıtla gerçekleştirilen çalışmada tek yakıtlı çalışmaya kıyasla %41 daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Debinin 0,9 kg/h olduğu durumda ise, HC emisyonunun çift yakıtlı çalışmada tek yakıtlı çalışmaya göre %30 arttığını bildirmişlerdir. NO, CO₂ ve is emisyonları incelendiğinde ise benzer sonuçları elde eden yazarlar, biyogazın akış hızının 0,9 kg/h olduğu çalışmalarda diğer akış hızlarına oranla motorun daha iyi performansa sahip olduğunu ve düşük emisyon ürettiğini belirtmişlerdir. ÖYT sonuçlarını inceleyen yazarlar, çift yakıtlı çalışmada elde edilen ÖYT verilerinin, tek yakıtlı çalışmada elde edilen verilerden yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Hesaplanan hacimsel verim ile ısı verim sonuçlarında ise, çift yakıtlı çalışmada hesaplanan verilerin, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmada hesaplanan değerlerden daha düşük çıktığını bildirmişlerdir [50].

Ujjval Saha ve Bhaskor Bora yaptıkları çalışmada biyogaz-dizel çift yakıtlı bir motorda sıkıştırma oranını değiştirerek performans, yanma ve emisyon karakteristiklerini karşılaştırmışlardır. Deneyler için, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı sıkıştırma ateşlemeli bir motoru biyogaz-dizel çift yakıtlı bir motora dönüştürmüşlerdir. Çalışma, farklı motor yüklerinde püskürtme zamanı Ü.Ö.N'den 23° önce ve 18, 17,5 ve 17 sıkıştırma oranları için gerçekleştirilmiştir. Maksimum yükte yapılan deneylerde, sıkıştırma oranının 18, 17,5 ve 17 olduğu çift yakıtlı çalışmalarda ısı verim değerlerinin sırasıyla %20,27, %19,97 ve %18,93 olduğunu belirtmişlerdir. Emisyon sonuçları incelendiğinde hem tek yakıtlı hem de çift yakıtlı çalışmada CO₂ emisyonunun motor yükünün artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Tüm test koşulları incelendiğinde CO₂ emisyonunun çift yakıt kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada sadece dizel yakıtla yapılan çalışmaya kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum, biyogazın içeriğinde bulunan yüksek CO₂ oranından kaynaklanmaktadır. Yazarlar ayrıca, motor yükünün artışıyla NO_x emisyonunda da artış gözlemlemişlerdir. Bu durum, sıcaklığa bağlı NO_x oluşumundan kaynaklanmaktadır. Buna rağmen, NO_x emisyonunun çift yakıtlı çalışmalarda tek yakıtlı çalışmaya kıyasla daha düşük çıktığını belirtmişlerdir.

CO ve HC emisyonları ise belirli bir yüke kadar artarken daha sonra ise azalmaya başlamıştır. Sıkıştırma oranının arttırılmasıyla CO ve HC emisyonlarında azalma olduğunu belirten yazarlar, NO_x ve CO₂ emisyonlarında ise artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca, tüm test koşullarında, CO ve HC emisyonlarının tek yakıtlı çalışmada çift yakıtlı çalışmaya göre daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Isıl verim değerlerini inceleyen yazarlar, ısı verimin motor yükü arttıkça arttığını ve dizel çalışmada elde edilen verilerin çift yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. Aynı zamanda hacimsel verimin de çift yakıtlı çalışmada dizel yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Egzoz gazı sıcaklıklarının ise motor yükü ile birlikte arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, çift yakıtlı çalışmada elde edilen egzoz gazı sıcaklık değerlerinin, dizel yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir [51].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, tek yakıt kullanılan çalışmalarda ölçülen emisyon değerlerinin, çift yakıtlı çalışmaya kıyasla daha düşük çıkmıştır. Çift yakıtlı çalışmalar incelendiğinde ise, pilot yakıt miktarının arttırılmasıyla HC ve CO emisyon değerlerinin azaldığı, NO_x ve is emisyonlarının ise genellikle arttığı görülmektedir. Sıkıştırma oranının değiştirildiği çalışmalarda, sıkıştırma oranının arttırılmasıyla HC ve CO emisyonlarının azaldığı görülürken, NO_x ve CO₂ emisyonlarının ise arttığı görülmüştür. Ayrıca, sıkıştırma oranının arttırılmasının performans ve emisyonlar açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. ÖYT sonuçlarına bakıldığında, sadece dizel yakıtla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen veriler, çift yakıtla gerçekleştirilen çalışmalardan daha düşük çıkmıştır. Pilot yakıt miktarının arttırılması ise ÖYT'nin az da olsa artmasına neden olmuştur. Çalışmalarda elde edilen ısı verim sonuçları incelendiğinde ise, motor gücünün arttırılmasıyla ısı verimin arttığı görülmüştür. Ayrıca, dizel yakıtla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen ısı verim değerleri, çift yakıtlı çalışmalarda elde edilen verilerden genellikle daha yüksek olmuştur. Pilot yakıt miktarının artması da ısı verimin artmasına neden olmuştur. Hacimsel verim değerleri de çift yakıtla gerçekleştirilen çalışmalarda, dizel yakıtlı çalışmalara kıyasla daha düşük olmuştur. Egzoz gazı sıcaklıklarında elde edilen verilere bakıldığında ise, motor yükü artışının egzoz gazı sıcaklıklarını arttırdığı görülmüştür.



Şekil 2.2. Deney düzeneği

2.1.1. Deney motoru

Deneylerde, direkt püskürtme sistemli, dört zamanlı, dört silindirli ve turbo şarjlı bir motor kullanılmıştır. Deney motorunun genel özellikleri Tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Deney Motorunun Genel Özellikleri

Silindir Hacmi	1600 cm ³
Silindir Sayısı	4
Valf Sayısı	8
Çap	76 mm
Strok	80,5 mm
Sıkıştırma Oranı	16,9
Maksimum Tork (1750 d/d)	160 Nm
Maksimum Güç (2000d/d)	48 kW
Püskürtme Sistemi	Common-Rail
Aşırı Doldurma	Var

2.1.2. Dinamometre

Deney motorunun yüklenmesinde kullanılan dinamometre, maksimum torku 475 Nm'ye, maksimum gücü 160 kW'ye ulaşabilen ve maksimum 8000 d/d devirle çalışabilen eddy current tipi bir dinamometredir. Bu dinamometrenin bağlandığı dinamometre yatağı, bir ısı dönüştürücüsüne sahip olup hem dinamometrenin hem de motorun soğutma işlemlerini gerçekleştirebilmektedir.

2.1.3. Hava yakıt ölçüm sistemleri

CO₂ ve CH₄ gazları tüp su hacmi 50 litre olan tüplerde depolanmaktadır. CO₂ ve CH₄ tüplerinin çıkışlarına bağlanan manometreler yardımı ile gazların basınçları ayarlanabilmektedir. Gazların, referans şartlara ulaşabilmeleri için regülatörler kullanılmıştır. Akış ölçerler ve ayar vanalı debimetrelerden geçen gazlar, motorun hava filtresi ve turbo doldurucusu arasında bulunan karışım odasına gönderilmektedir. Karışım odası içerisinde oluşturulan biyogaz, motorun oluşturduğu vakum ile silindirlere emilir.

CH₄ tüpünün çıkışında bulunan manometreden sonra güvenlik amacıyla CH₄ besleme hattına alev kesici bağlanmıştır. Bu gazların çalışmada planlanan oranlarda (%60 CH₄-%40 CO₂) motora gönderilebilmeleri için gaz hattına bağlanan ayar vanalı debimetreler kullanılarak akış ölçerlerden okunan değerler doğrultusunda miktarları ayarlanmıştır. Şekil 2.3'de deney düzeneğinde bulunan gaz besleme sistemine ait tüpler görülmektedir.



Şekil 2.3. Gaz tüpleri

Hava miktarı, hava filtresi ve gaz karışım odası arasında bağlanan daldırma tip kütleli akış ölçer ile ölçülmüştür. CO₂ ve CH₄ yakıtlarının miktarı ise flanşlı tip kütleli akış ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Dizel yakıtın debisi, hacimsel beherde yer alan yakıtın 10 ml’lik bölümünün bir kronometre yardımıyla ne kadar sürede tüketildiği tespit edilerek bulunmuştur. Tablo 2.2’de akış metrelerin özellikleri görülmektedir.

Tablo 2.2. Deneyde kullanılan akış metrelerin özellikleri

Özellik	CH ₄	CO ₂	Hava
Besleme	24 (VDC)	24 (VDC)	24 (VDC)
Hassasiyet	1 (%)	1 (%)	1 (%)
Ölçme Aralığı	200 (l/d)	200 (l/d)	0-1200 (m ³ /h)
Basınç	0,1 (MPa)	0,1 (MPa)	0,1 (MPa)
Sıcaklık	20 (°C)	20 (°C)	20 (°C)
Çıkış	4-20 (mA)	4-20 (mA)	4-20 (mA)
Bağlantı	Flanş	Flanş	Daldırma

2.1.4. Emisyon ölçüm sistemi

İYM’ler, HC, NO_x, CO gibi sağlığa zararlı emisyonlarla birlikte CO₂ gibi küresel ısınmaya etkileri göz ardı edilemeyecek, çevreye zararlı emisyonlar da üretmektedir. Tablo 2.3’de emisyon cihazına ait özellikler gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Emisyon cihazına ait özellikler

Emisyonlar	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet	Birim
Karbondiyoksit (CO ₂)	%0-18	%0,01	vol.
Karbon Monoksit (CO)	%0-10	%0,001	vol.
Oksijen (O ₂)	%0-22	%0,01	vol.
Hidrokarbon (HC)	0-9999	1	ppm
Azot Oksit (NO _x)	0-5000	1	ppm
Soğurma Katsayısı (k)	0-10	0,01	m ⁻¹
Hava Fazlalık Katsayısı (HFK)	0,5-1,8	0,001	---

Motor deneyleri yapılırken, motorun performansı kadar ürettiği emisyonlarda büyük bir önem arz etmektedir. Deneylerde NO emisyonlarını ölçen bir cihaz kullanılmıştır. NO_x emisyonları ölçülen NO emisyon değerlerinin üretici tarafından belirlenen 1,2 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Şekil 2.4’de is emisyonlarının ölçümünde kullanılan Bosch is ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 2.4. Bosch is ölçüm cihazı

2.2. Deney Sonuçlarının İncelenmesinde Kullanılan Hesaplama Yöntemleri

Yapılan çalışmalar sonucunda ölçüm sistemlerinden toplanan veriler kullanılarak, özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi, hacimsel verim, ısı verim ve egzoz emisyonlarının hesaplamaları aşağıda verilen formüller yardımıyla yapılmıştır.

2.2.1. Özgül yakıt tüketimi

Yakıt tüketiminin bulunması, hacimsel beherde bulunan yakıtın tüketildiği süre ölçülerek hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_y = \frac{V_y \cdot \varphi_y \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{t} \quad (2.1)$$

$\dot{m}_y$: Kütlesel debi (kg/h)

V_y : Hacim (l)

ϕ_y : Yoğunluk (kg/m³)

t: süre (s)

Yukarıdaki denklemde bulunan değerler denklem 2.2’de kullanılarak ÖYT hesaplanır.

$$\text{ÖYT} = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \cdot 10^3 \quad (2.2)$$

ÖYT: Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

P_e : Motor gücü (kW)

2.2.2. Özgül enerji tüketimi

Özgül enerji tüketimi (ÖET), deneyde kullanılan motorda birim güç başına harcanan enerji olarak tanımlanır ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{ÖET} = \text{ÖYT} \cdot \text{LHV} \quad (2.3)$$

ÖET: Özgül enerji tüketimi (kJ/kWh)

LHV: Alt ısı değeri (kJ/kg)

2.2.3. Hacimsel verim

Motorun çalışması sırasında, silindirlere alınan gerçek hava miktarının, silindire alınabilecek teorik hava miktarına oranı hacimsel verim olarak bilinmektedir. Teorik havanın kütleli debisi aşağıdaki formülle bulunabilir.

$$\dot{m}_{ht} = \frac{V_s \cdot \phi_h \cdot n \cdot 60 \cdot z}{2} \quad (2.4)$$

$\dot{m}_{ht}$: Teorik havanın kütleli debisi (kg/h)

V_s : Strok hacmi (m³)

n: Motor devri (d/d)

ϕ_h : Hava yoğunluğu (kg/m³)

z: Silindir sayısı

Hacimsel verim ise aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{\text{hgerçek}}}{\dot{m}_{\text{ht}}} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$\dot{m}_{\text{hgerçek}}$: Havanın kütleli debisi (kg/h)

η_v : Hacimsel verim (%)

2.2.4. Isıl verim

Motorun ısı verimi, birim zamanda yapılan işin yanma işleminde açığa çıkan yakıt enerjisi miktarına oranı olarak bilinmektedir. Yakıt enerjisi aşağıdaki eşitlikle bulunabilir.

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_y \cdot \text{LHV} \quad (2.6)$$

$\dot{Q}_h$: Yakıt enerjisi miktarı (kW)

Isıl verim aşağıda verilen formülle hesaplanmıştır.

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{W}_{\text{net}}}{\dot{Q}_h} \cdot 100 \quad (2.7)$$

η_{th} : Isıl verim (%)

$\dot{W}_{\text{net}}$: Birim zamanda yapılan net iş (kW)

2.2.5. Egzoz emisyonlarının hesaplanması

Egzoz emisyon cihazının ölçtüğü verilerin g/kWh birimine dönüştürülmesi aşağıdaki eşitlik yardımıyla gerçekleştirilmiştir [52].

$$\text{EP} = \text{EV} \cdot \frac{M_i}{M_{\text{ex}}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{ex}}}{P_e} \quad (2.8)$$

EP: Özgül emisyon üretimi (g/kWh)

EV: Egzoz bileşeninin egzoz gazı içerisindeki hacimsel değeri (ppm)

M_i : Egzoz bileşeni mol kütlesi (g/mol)

M_{ex} : Egzoz gazı mol kütlesi (g/mol)

$\dot{m}_{\text{ex}}$: Egzoz gazı kütleli debisi (kg/h)

2.2.6. Hata analizi

Deney verilerine ait hata analizleri Kline ve McClintock metoduyla hesaplanmıştır. Bu oranlar EK-1 Tablo 1’de gösterilmiştir [53].

$$h_{top} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

h_{top} = Toplam hata oranı (%)

a,b,c = Hata oranları (%)

2.3. Deney Yöntemi

Çalışma, motorun deney düzeneğine yerleştirilmesiyle başlamıştır. Ardından, sıkıştırma ile ateşlemeli motorun akıt ikmalini sağlamak için dinamometre yatağı üzerinde bulunan yakıt deposu kullanılmıştır. Motorun çift yakıtlı olarak çalışabilmesi için, emme kanalına turbo doldurucudan önce basit bir karışım odası eklenerek, CH₄ ve CO₂ gazlarının bulunduğu tüplere bağlı besleyici borular bu karışım odasına bağlanmıştır.

Tablo 2.4’de deneylerde kullanılan yakıtların motorun enerji ihtiyacını karşılama oranları görülmektedir.

Tablo 2.4. Deneylerde kullanılan yakıt oranları

Yakıt	Dizel	BG+D20	BG+D30	BG+D40	BG+D50
Biyogaz	%0	%80	%70	%60	%50
Dizel	%100	%20	%30	%40	%50

BG+D20: Motorun enerji ihtiyacının %20’sinin pilot yakıttan %80’nin biyogazdan karşılandığını ifade eder.

BG+D30: Motorun enerji ihtiyacının %30’nun pilot yakıttan %70’nin biyogazdan karşılandığını ifade eder.

BG+D40: Motorun enerji ihtiyacının %40’ın pilot yakıttan %60’nın biyogazdan karşılandığını ifade eder.

BG+D50: Motorun enerji ihtiyacının %50’sinin pilot yakıttan %50’sinin biyogazdan karşılandığını ifade eder.

Deney motoru maksimum yükü 1750 d/d’da üretmektedir. Bu nedenle deneylerde bahsi geçen motor devri sabit tutulurken motor yükü 40, 60 ve 80 Nm olarak değiştirilmiştir.

Deneyler kısmi yük sabit devir şatlarında yapılmıştır. İlk olarak, deney motoru tek yakıtla çalıştırılmıştır. Belirlenen yük değerlerine ulaşmak için sarf edilen dizel yakıt miktarı hedeflenen yük değerlerine ulaşmak için ihtiyaç duyulan dizel yakıt miktarı ölçülerek referans bir değer elde edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda, belirlenen referans dizel yakıt miktarının %20'si ila %50'si, %10'luk artışlarla hesaplanmış, yanmanın başlatılması için pilot yakıt olarak kullanılmıştır.

Deneyler başlamadan önce, çalışmanın en doğru sonuçları verebilmesi için motor soğutma suyu sıcaklığının 70 °C'ye ulaşması beklenmiştir. Yapılan deneyler üç defa tekrar edilmiş ve en doğru sonuçlar için bu deney verilerinin ortalamaları hesaplanmıştır.

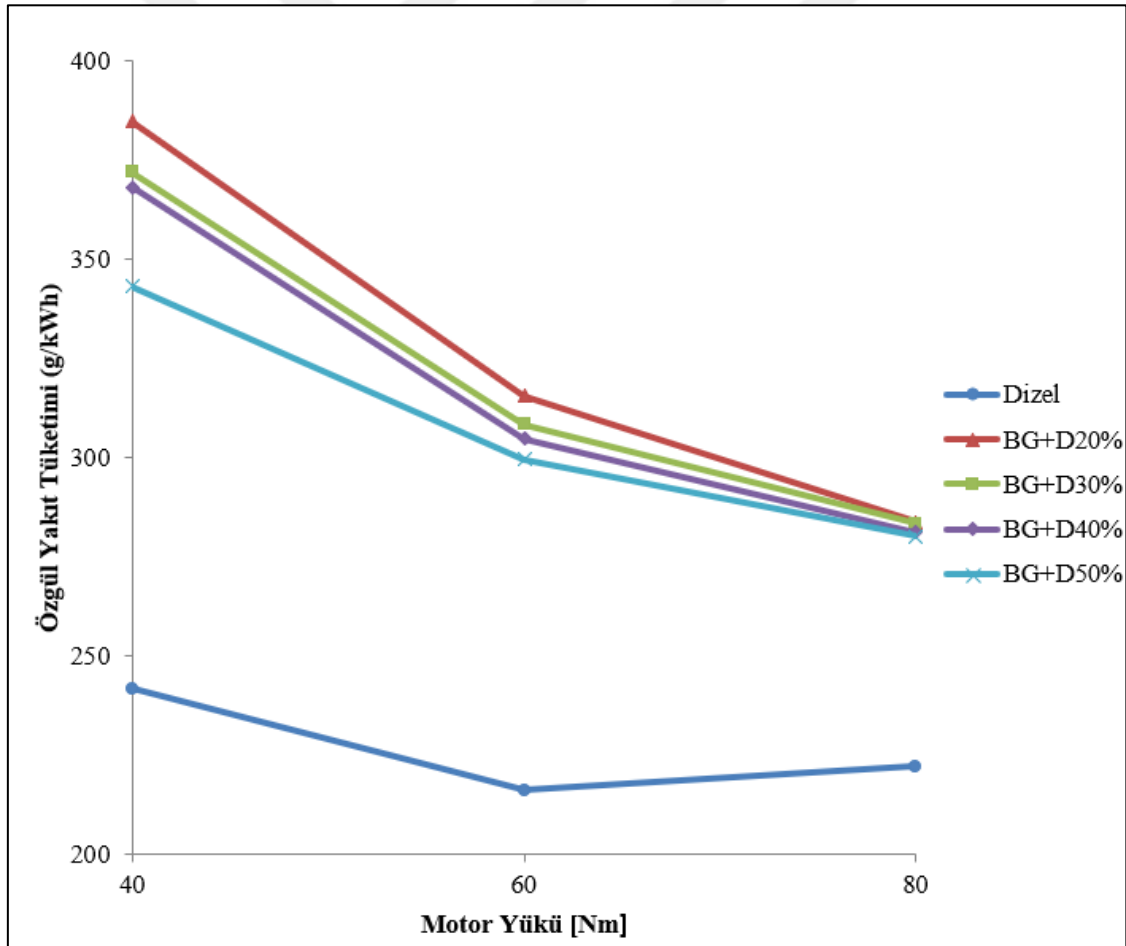


3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde 1750 d/d sabit devirde, 40 Nm, 60 Nm ve 80 Nm motor yüklerinde çalıştırılan sıkıştırma ateşlemeli motorda, farklı miktarlarda pilot ve biyogaz yakıtlarının kullanılmasıyla elde edilen veriler grafikler halinde sunularak yorumlanmıştır.

3.1. Özgül Yakıt Tüketimi

ÖYT'nin hesaplanmasında dizel yakıtlı ve biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalardan elde edilen deney verileri kullanılmıştır. Pilot dizel yakıt oranları deney prosedüründe belirtildiği gibi motorun ihtiyaç duyduğu enerjinin %20 ile %50 arasında %10'luk artışlarla belirlenmiştir. Şekil 3.1'de hesaplanan ÖYT'lerin tek yakıtlı çalışma ve çift yakıtlı çalışma için bulunan değerleri görülmektedir.



Şekil 3.1. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ÖYT değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖYT değeri 241,83 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖYT, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %59,07, %53,85, %52,27 ve %41,9 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 384,7 g/kWh, %30 ile 372,05 g/kWh, %40 ile 368,25 g/kWh, %50 ile 343,18 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖYT 216,14 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖYT, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %45,96, %42,55, %41,03 ve %38,61 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 315,48 g/kWh, %30 ile 308,37 g/kWh, %40 ile 304,83 g/kWh ve %50 ile 299,6 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

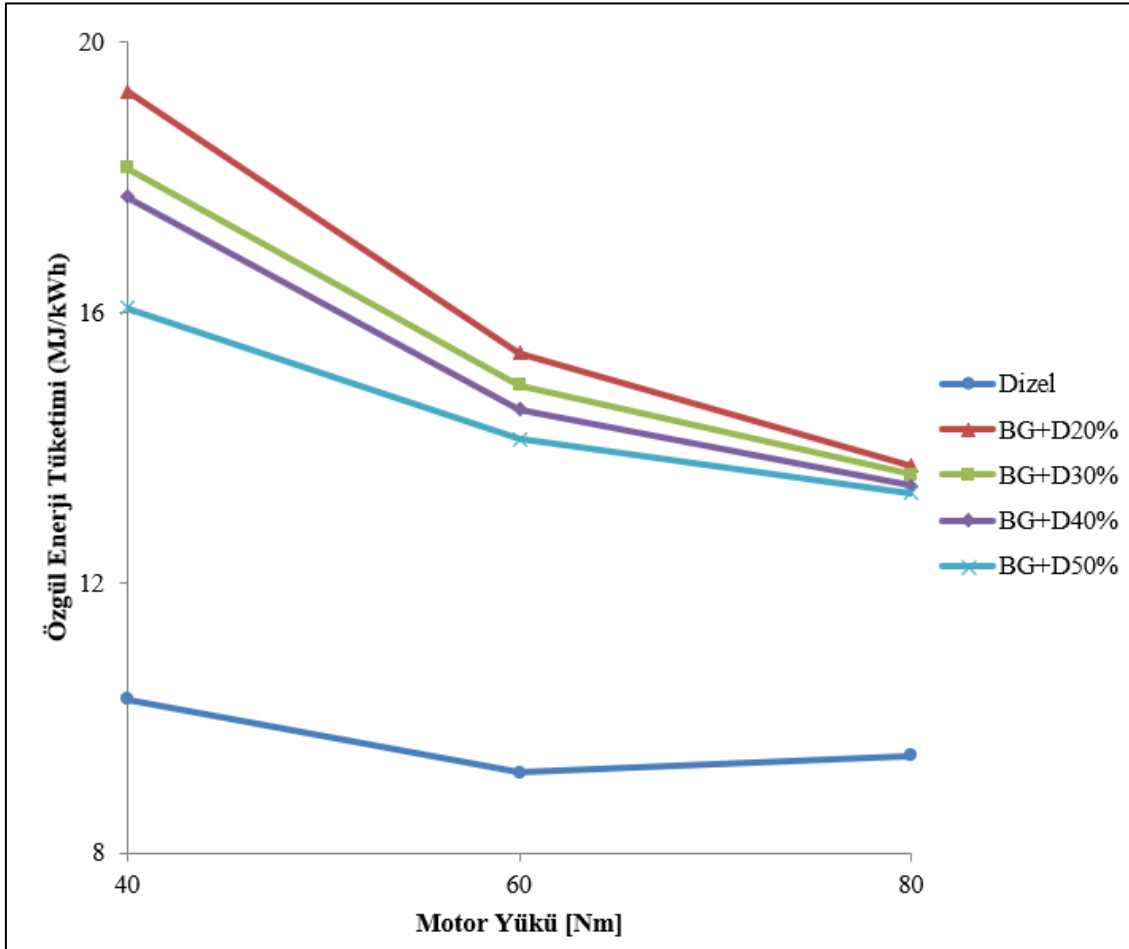
80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖYT 222,1 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖYT, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %27,79, %27,54, %26,54 ve %26,11 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 283,83 g/kWh, %30 ile 283,28 g/kWh, %40 ile 281,06 g/kWh ve %50 ile 280,11 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

Grafik incelendiğinde, ÖYT'lerin çift yakıtlı çalışmalarda yük miktarı ve pilot yakıt miktarı arttıkça azaldığı görülmektedir. Tek yakıtlı çalışmada en düşük ÖYT 60 Nm motor yükünde elde edilmiştir. Tüm deneyler incelendiğinde, tüm motor yüklerinde tek yakıtlı çalışmada elde edilen verilerin daha düşük ÖYT'ye sahip oldukları görülmüştür. Yanma verimliliği düşük yüklere kıyasla orta ve yüksek yüklerde tüm yakıtlar ile artmaktadır. Tek yakıtlı çalışmaya kıyasla çift yakıtlı çalışmada biyogaz içerisinde bulunan CO₂'nin yanma üzerine olumsuz etkileri vardır. Motora gönderilen biyogaz miktarının azaltılmasına bağlı olarak yanmayı kötüleştiren CO₂ miktarı düşer. Bununla birlikte düşük yüklerde karışım çok fakir olduğundan CH₄ ya çok geç yanar ya da yanmadan silindirden dışarı atılır. Yüke bağlı olarak azalan hava/yakıt oranı daha tutuşabilir biyogaz/hava karışımlarının oluşmasını sağlar. Yük arttıkça CO₂'nin yanma üzerine olan olumsuz etkisi azalmaktadır [54]. Ayrıca yüke bağlı olarak artan pilot yakıt

miktarı alev sönme bölgelerini azaltarak yanmayı iyileştirir. Saleel Ismail ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada benzer sonuçlar elde etmişlerdir [55].

3.2. Özgül Enerji Tüketimi

ÖET, deney motorunun birim güçte harcanan enerji olarak tanımlanabilir. ÖET'nin hesaplanması, bu çalışmada yapılan tek ve çift yakıtlı çalışmaların kıyaslanabilmesi açısından faydalı olmuştur. Şekil 3.2'de hesaplanan ÖET'lerin dizel yakıtlı çalışma ve çift yakıtlı çalışma için bulunan değerleri görülmektedir.



Şekil 3.2. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ÖET değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖET değeri 10,274 MJ/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖET, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %87,65, %76,56, %72,47 ve %56,41 oranlarında artarak,

%20 pilot yakıt ile 19,28 MJ/kWh, %30 ile 18,14 MJ/kWh, %40 ile 17,72 MJ/kWh ve %50 ile 16,07 MJ/kWh olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖET değeri 9,186 MJ/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖET, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %67,64, %62,42, %58,61 ve %53,71 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 15,4 MJ/kWh, %30 ile 14,92 MJ/kWh, %40 ile 14,57 MJ/kWh ve %50 ile 14,12 MJ/kWh olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ÖET değeri 9,44 MJ/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ÖET, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %45,44, %44,06, %42,26 ve %41,14 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 13,73 MJ/kWh, %30 ile 13,6 MJ/kWh, %40 ile 13,43 MJ/kWh ve %50 ile 13,32 MJ/kWh olarak hesaplanmıştır.

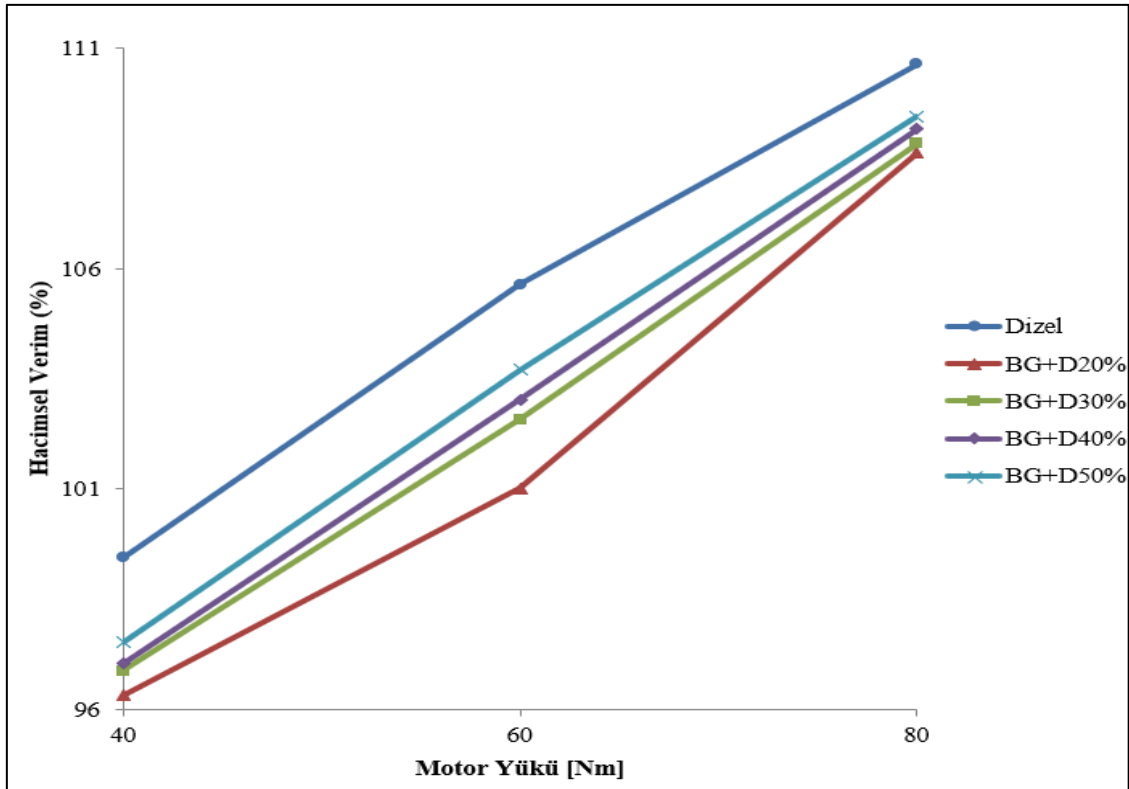
Biyogazın sahip olduğu düşük ısı değeri nedeniyle, silindir içerisine gönderilen biyogaz miktarı azaldıkça ÖET azalmaktadır. Çift yakıtlı çalışmada oluşturulan homojen dolgunun yanmasıyla oluşan ısı enerjisinin bir bölümü silindir cidarlarından motor soğutma suyuna geçmektedir [56]. Grafikten anlaşılabacağı üzere, en yüksek ÖET çift yakıtlı çalışmalarda pilot yakıt oranının %20 olduğu çalışmada elde edilmiştir. Sonuçlar ÖYT’de hesaplanan veriler ile benzer çıkmıştır. Artan motor yüküne bağlı olarak silindire emilen yakıt hava karışımının zenginleşmesi ve püskürtülen pilot yakıt miktarındaki artış, yanmayı iyileştirmiştir. Duc ve Wattanavichien yaptıkları çalışmada çift yakıtlı motorlarda düşük yüklerde yanma veriminin azaldığını buna bağlı olarak ÖET’nin arttığını bildirmişlerdir [57].

3.3. Hacimsel Verim

Bir çevrim sırasında motora emilen hava miktarı, motor karakteristiklerini belirleyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Bir motorun ne kadar çok efektif güç üretmesi bekleniyorsa o kadar çok yakıtın yakılması gereklidir. Artan yakıt miktarına bağlı olarak yanma işleminin tam olarak gerçekleşebilmesi için silindir içerisine alınan havanın miktarının da artırılması gereklidir. Bununla birlikte çok miktardaki gaz halindeki

havayı silindirlere emmek, az miktardaki sıvı haldeki yakıtı silindir içine göndermekten çok daha zordur [58].

Hacimsel verim, silindirlere alınan gerçek havanın kütleli debisinin, silindirlere alınabilecek teorik havanın kütleli debisinin oranıyla hesaplanmıştır. Gerçek havanın kütleli debisi, farklı motor yükü ve pilot yakıt miktarlarında yapılan deneylerde bulunan havanın hacimsel debisi ile havanın yoğunluğunun çarpılmasıyla elde edilmiştir. Teorik havanın kütleli debisinin bulunmasında ise motor özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 3.3’de tek ve çift yakıtlı çalışmalar için hesaplanan hacimsel verim değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan hacimsel verim değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada hacimsel verim değeri %99,45 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında hacimsel verim, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %3,25, %2,65, %2,48 ve %1,98 oranlarında

azalarak, %20 pilot yakıt ile %96,32, %30 ile %96,88, %40 ile %97,04 ve %50 ile %97,52 olarak hesaplanmıştır.

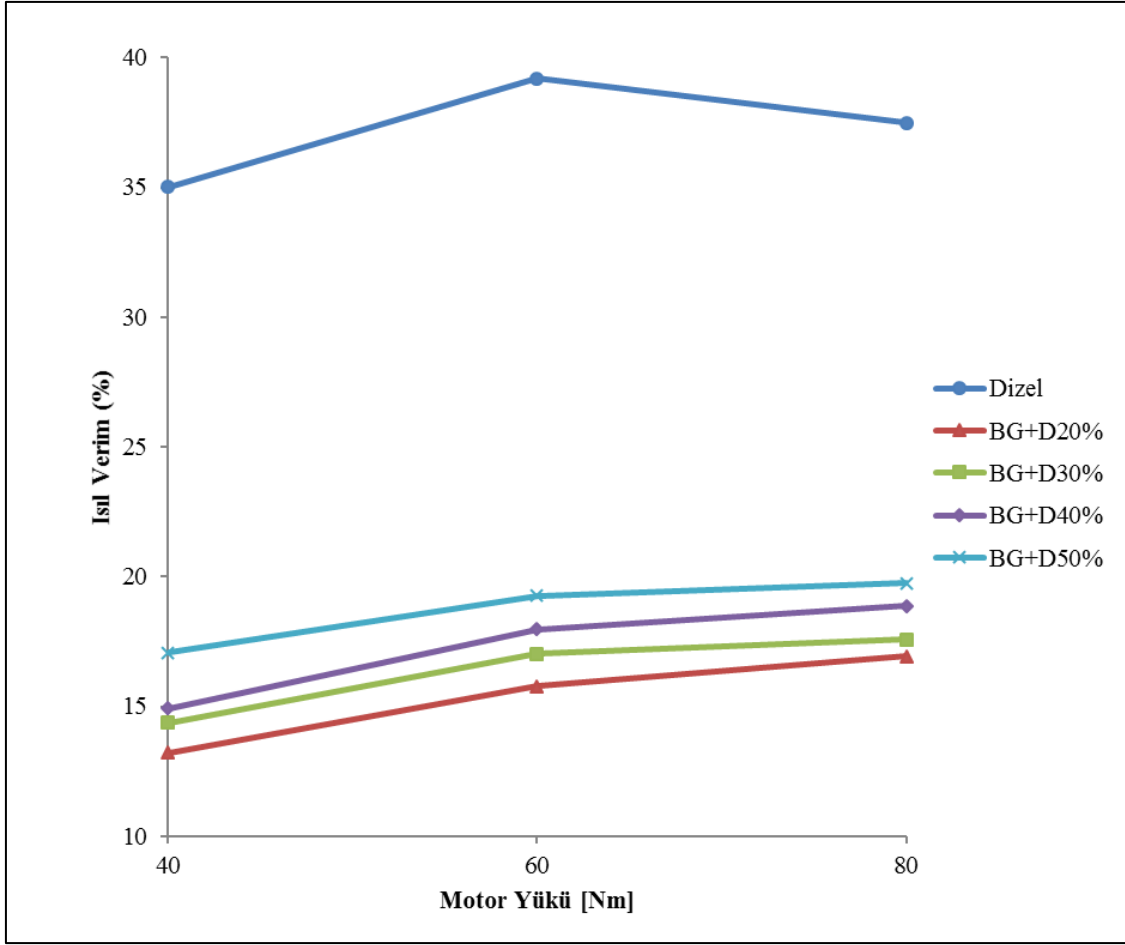
60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada hacimsel verim değeri %105,64 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında hacimsel verim, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %4,57, %2,98, %2,53 ve %1,87 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile %101,02, %30 ile %102,58, %40 ile %103,03 ve %50 ile %103,7 olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada hacimsel verim değeri %110,63 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında hacimsel verim, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %1,85, %1,64, %1,34 ve %1,08 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile %108,62, %30 ile %108,84, %40 ile %109,16 ve %50 ile %109,45 olarak hesaplanmıştır.

Grafik analiz edildiğinde, en yüksek hacimsel verimin dizel yakıtlı çalışmalarda 80 Nm motor yükü değerinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, tek yakıtlı çalışmadaki tüm motor yüklerinde hacimsel verim, çift yakıtlı çalışmalara kıyasla yüksek olmuştur. En düşük hacimsel verim çift yakıtlı çalışmada pilot yakıt oranının %20, motor yükünün ise 40 Nm olduğu çalışmada meydana gelmiştir. Hacimsel verim yükün artmasına ve biyogaz miktarının azalmasına bağlı olarak artmaktadır. Motor yüküne bağlı olarak hacimsel verimde görülen artış, silindirlere alınan yakıt miktarının artışına bağlı olarak yükselen egzoz gaz sıcaklıklarının turbo doldurucunun verimini olumlu yönde etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Gaz yakıtların silindir içerisindeki havanın yerini alması nedeniyle hacimsel verim azalır. Bununla birlikte artan gaz sıcaklıklarına bağlı olarak yükselen turbo doldurucu verimi bu azalmayı telafi etmektedir [59].

3.4. Isıl Verim

Motorun ısı verimi, birim zamanda yapılan işin, yapılan çalışmalardaki yakıt enerjisi miktarına oranı ile hesaplanmıştır. Şekil 3.4’de tek ve çift yakıtlı çalışmalar için hesaplanan ısı verim değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla hesaplanan ısı verim değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ısı verim değeri %30,74 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ısı verim, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %64,73, %55,01, %51,35 ve %37,29 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile %18,66, %30 ile %19,83, %40 ile %20,31 ve %50 ile %22,39 olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ısı verim değeri %39,19 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ısı verim, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %67,76, %62,68, %58,72 ve %53,8 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile %23,36, %30 ile %24,09, %40 ile %24,69 ve %50 ile %25,48 olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada ısı verim değeri %38,13 olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında ısı verim, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %45,64, %44,05, %42,38 ve %41,17 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile %26,18, %30 ile %26,47, %40 ile %26,78 ve %50 ile %27,01 olarak hesaplanmıştır.

Grafığe bakıldığında ısı verim değerlerinin tek yakıtlı çalışmada tüm motor yükleri için çift yakıtla yapılan çalışmalardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, çift yakıtlı çalışmalarda dizel yakıt miktarının arttırılması ısı verimin yükselmesine neden olmuştur. Çift yakıtlı çalışmaların tümünde motor yükünün artması ısı verimin de artmasını sağlamıştır.

İçeriğinde CO₂ bulunan yakıtların ısı verimlilikleri düşük çıkmaktadır. CO₂'nin yanmaya olumsuz etkisi vardır. Biyogaz yakıtlı çalışmalarda ısı verimliliğin düşük olmasının bir diğer nedeni silindir içerisindeki alev yayılma hızının azalmasıdır. Düşük yüklerde oluşturulan fakir karışımlar nedeni ile alev sönme bölgelerinde artmaktadır. Bu durum yanmayı kötüleştirir ve ısı verimi düşürür. Ayrıca silindir içerisindeki sıcaklıkların düşük olması yanmayı kötüleştirir. Bununla birlikte gaz yakıtlı çalışmalarda motor yüküne bağlı olarak silindir içerisinde zengin bir karışım oluşmasıyla ısı verimde iyileşmeler görülmektedir. Hacimsel verimin ve silindir içi sıcaklıkların artışlarına bağlı olarak ısı verim yükselmiştir [60].

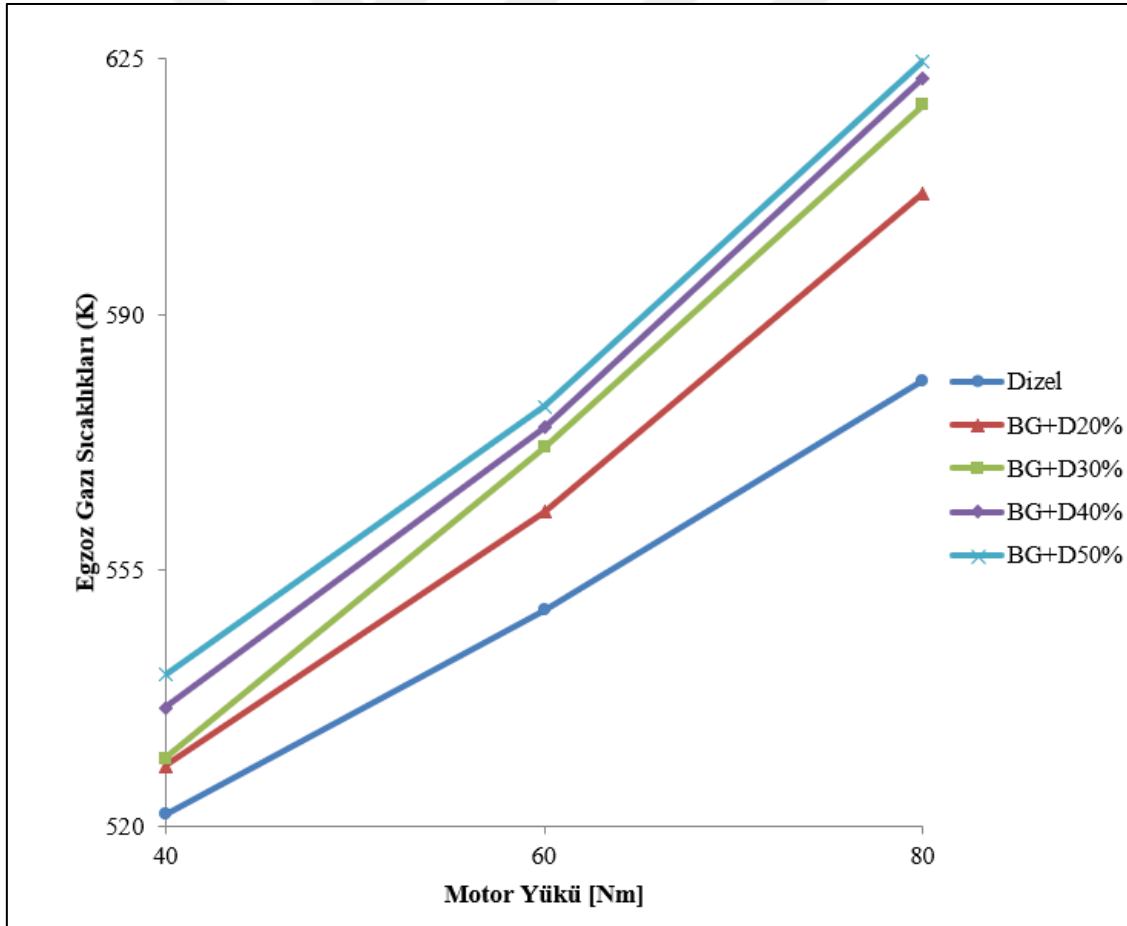
3.5. Egzoz Gazı Sıcaklıkları

Şekil 3.5'de egzoz gazı sıcaklıklarının tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarla elde edilen en yüksek değerleri gösterilmiştir.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada egzoz gazı sıcaklığının en yüksek değeri 521,65 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında egzoz gazı sıcaklığı, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %1,26, %1,28, %2,79 ve %3,66 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 528,25 °K, %30 ile 528,35 °K, %40 ile 536,25 °K ve %50 ile 540,75 °K olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada egzoz gazı sıcaklığının en yüksek değeri 549,55 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında egzoz gazı sıcaklığı, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %2,46, %4,05, %4,55 ve %5,07 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 563,05 °K, %30 ile 571,85 °K, %40 ile 574,55 °K ve %50 ile 577,45 °K olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada egzoz gazı sıcaklığının en yüksek değeri 580,95 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında egzoz gazı sıcaklığı, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %4,42, %6,49, %7,12 ve %7,52 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 606,65 °K, %30 ile 618,65 °K, %40 ile 622,35 °K ve %50 ile 624,65 °K olarak hesaplanmıştır.



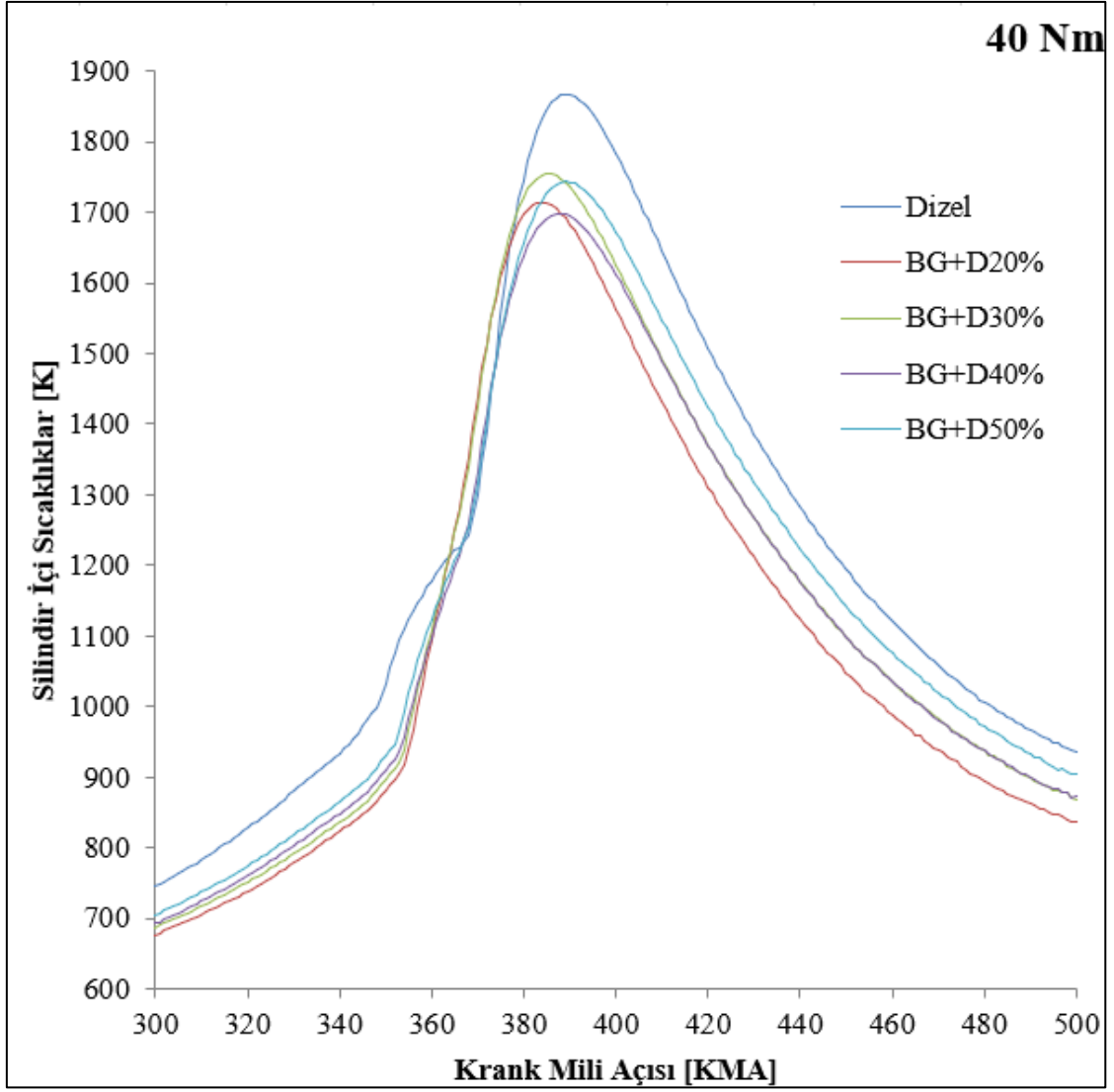
Şekil 3.5. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt oranlarıyla ölçülen en yüksek egzoz gazı sıcaklıkları değerleri.

Gaz yakıtlı çalışmalarda, silindir içerisindeki CO₂ miktarının artmasına bağlı olarak yanma için gerekli O₂ miktarı azalmaktadır. Ayrıca CO₂'nin alev yayılma hızına olumsuz etkisi vardır. Motor yüküne bağlı olarak silindirlere alınan yakıt miktarları artmakta ve yanma sonu iş zamanının sonlarına doğru kaymaktadır. Ayrıca silindir içerisinde alınan gaz yakıt miktarının artmasına bağlı olarak yanmanın egzoz zamanında da devam ettiği düşünülmektedir. Yüke bağlı olarak silindir içerisinde bulunan yakıt miktarları da artmakta ve egzoz gaz sıcaklıklarını yükseltmektedir. Feroskhan ve Ismail'de yaptıkları çalışmada egzoz gazı sıcaklıklarında benzer sonuçları elde etmişlerdir [54].

3.6. Silindir İçi Sıcaklıklar

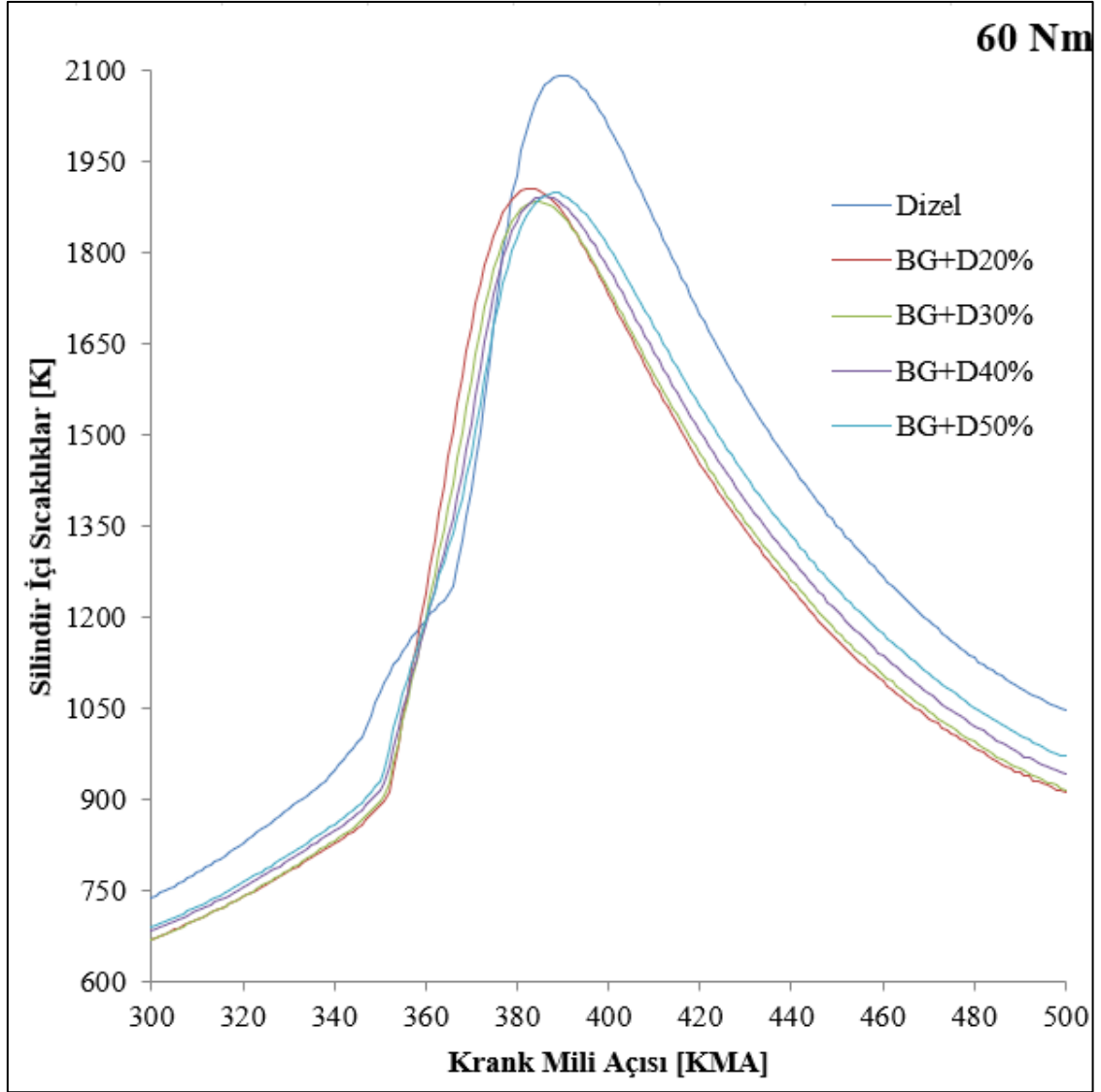
Silindir içi sıcaklığın yüksek olduğu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma sırasında, yüksek düzeyde NO_x ve is emisyonları oluşmaktadır. Fakat çift yakıtlı çalışmalarda CO₂ miktarının arttırılması, silindir içi sıcaklıkları ve O₂ konsantrasyonunu düşürerek daha az NO_x ve is emisyonuna neden olur [61].

Şekil 3.6'da 40 Nm motor yükü için silindir içi sıcaklıklar verilmiştir. Tek yakıtlı çalışmada en yüksek silindir içi sıcaklık değeri 389 °KMA'da 1867 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında en yüksek silindir içi sıcaklıklar, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %8,19, %6,05, %9,05 ve %6,58 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt oranı ile 384 °KMA'da 1714 °K, %30 ile 385 °KMA'da 1754 °K, %40 ile 388 °KMA'da 1698 °K ve %50 ile 389 °KMA'da 1744 °K olarak hesaplanmıştır.



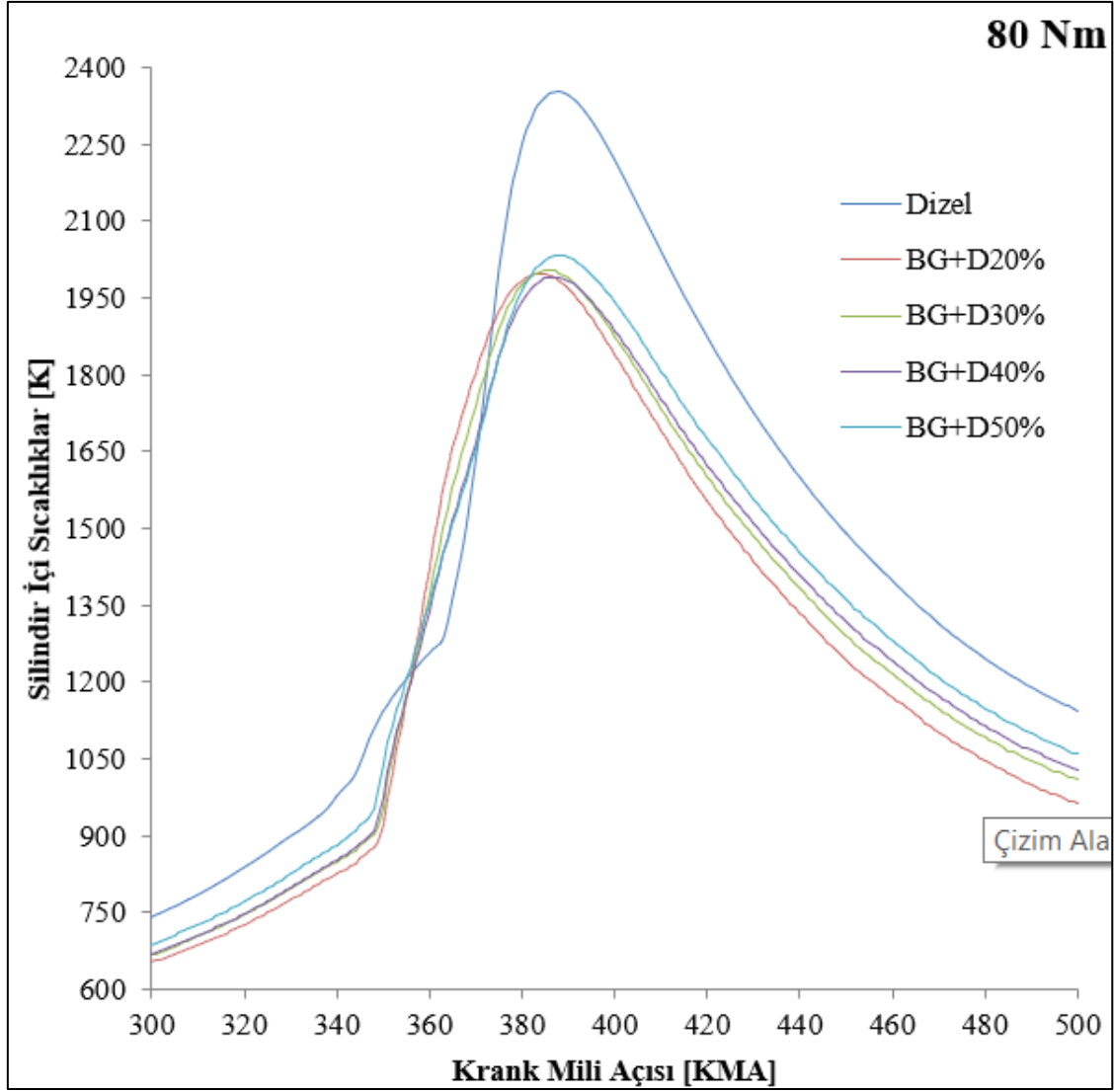
Şekil 3.6. 40 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar

Şekil 3.7’de 60 Nm motor yükü için silindir içi sıcaklıklar verilmiştir. Tek yakıtlı çalışmada en yüksek silindir içi sıcaklık değeri 390 °KMA’da 2093 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında en yüksek silindir içi sıcaklıklar, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %8,93, %9,93, %9,55 ve %9,31 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt oranı ile 383 °KMA’da 1906 °K, %30 ile 384 °KMA’da 1885 °K, %40 ile 386 °KMA’da 1893 °K ve %50 ile 389 °KMA’da 1898 °K olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. 60 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar

Şekil 3.8’de 80 Nm motor yükü için silindir içi sıcaklıklar verilmiştir. Tek yakıtlı çalışmada en yüksek silindir içi sıcaklık değeri 388 °KMA’da 2355 °K olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında en yüksek silindir içi sıcaklıklar, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %15,16, %14,86, %15,45 ve %13,67 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt oranı ile 384 °KMA’da 1998 °K, %30 ile 385 °KMA’da 2005 °K, %40 ile 387 °KMA’da 1991 °K ve %50 ile 388 °KMA’da 2033 °K olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.8. 80 Nm için ölçülen silindir içi sıcaklıklar

Biyogaz içerisinde bulunan inert CO_2 gazı yanmayı kötüleştirerek silindir içi sıcaklıkları düşürmüştür. Silindir içerisinde bulunan CO_2 'nin EGR etkisi gösterdiği söylenebilir. Bununla birlikte %60 CH_4 ve %40 CO_2 'den oluşan biyogazın politropik üssü 1,305 olmaktadır. Bu durumda çift yakıtlı çalışmada sıkıştırma sonu sıcaklıkları daha düşük olmaktadır [62]. Tek yakıtlı çalışmada, silindir içerisine alınan hava sıkıştırılarak üzerine yakıt püskürtülür ve heterojen bir yanma gerçekleşir. Silindir cidarlarında bulunan hava yalıtım görevi görerek silindir içerisinde oluşan ısının soğutma suyuna geçişini zorlaştırır. Bu durumdan farklı olarak çift yakıtlı çalışmada yakıt/hava karışımı silindir içerisine homojen şekilde dağılmaktadır. Homojen yakıt/hava karışımının tutuşturulması için püskürtülen pilot yakıt silindir içerisinde farklı noktalarda yanma başlatır ve alev silindir cidarlarına doğru yayılır. Bu durumda silindir cidarlarından

soğutma suyuna olan ısı geçişi artar ve silindir içi sıcaklıklar düşer. Yoon ve Lee çalışmalarında, benzer sonuçlar elde etmişlerdir [63].

3.7. Egzoz Emisyonları

Otomobiller günümüzde ulaşım sisteminde çok önemli bir yere sahiptir. Nüfus ve yaşam standartlarının yükselmesi ile birlikte ulaşım araçlarının sayıları her geçen gün artmaktadır. Bundan dolayı, özellikle araç sayısının yoğun olduğu büyük şehirlerde egzoz emisyonlarına bağlı çevre kirliliğindeki artış kaçınılmaz olmaktadır. Bir hidrokarbonun hava ile yanması sonucunda CO₂, H₂O gibi tam yanma ürünlerinin yanı sıra CO, HC, NO_x ve is gibi emisyonlarda oluşmaktadır [64]. Yapılan deneylerde ölçülen emisyonlar alt başlıklarda anlatılmıştır.

3.7.1. Hidrokarbon (HC) emisyonları

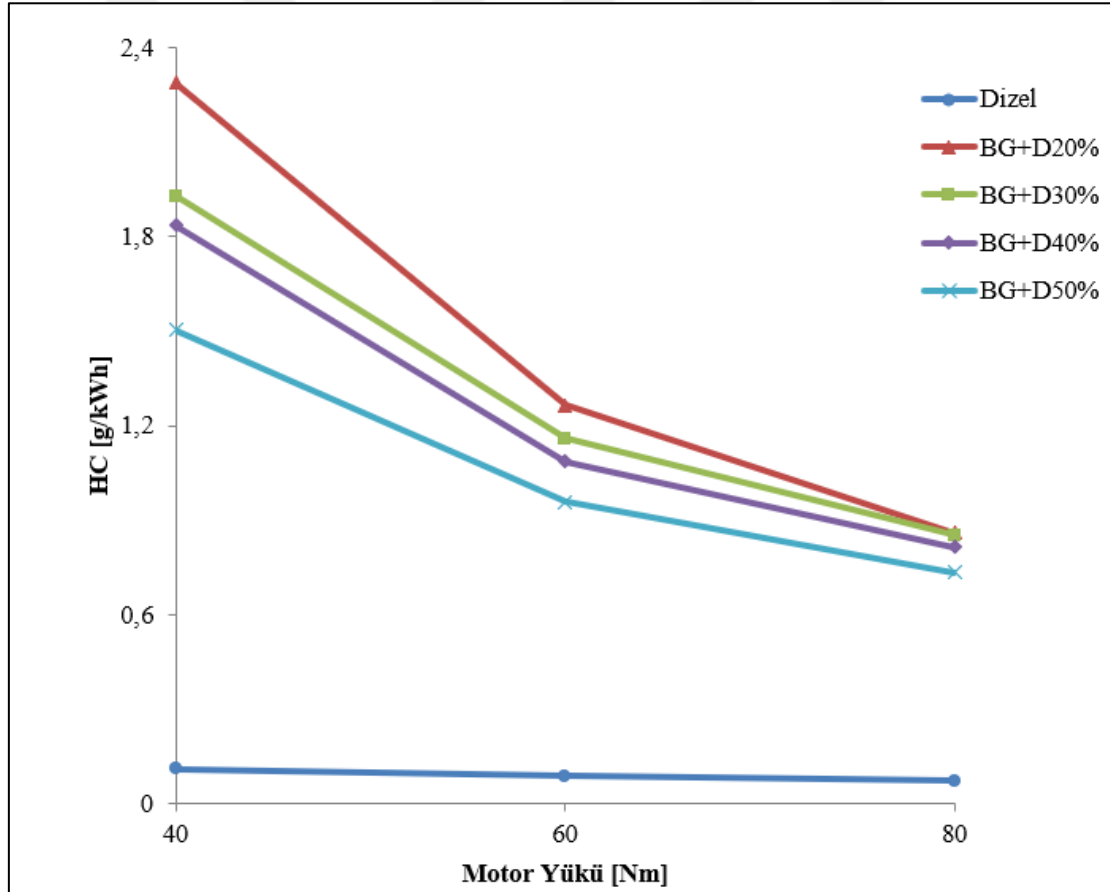
İYM’lerde HC emisyonları, silindir içerisindeki oksijen miktarına ve sıcaklığa bağlı olarak yanmanın tamamlanamaması nedeniyle meydana gelmektedir. Silindir içerisindeki hava/yakıt karışımının çok fakir ya da çok zengin olması, silindir cidarlarında meydana gelen alev sönme bölgeleri nedeniyle eksik yanmanın nedenleri arasında gösterilebilir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yüksek hava fazlalığı ile çalıştıktıklarından HC emisyonları buji ateşlemeli motorlara göre daha düşük olmaktadır [65]. Şekil 3.9’de tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen HC emisyonu değerleri görülmektedir.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada HC emisyonu 0,11 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında HC emisyonları tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %1981,8, %1654,5, %1569 ve %1266,36 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 2,29 g/kWh, %30 için 1,93 g/kWh, pilot yakıt oranının %40 ve %50 olduğu durumda ise 1,836 g/kWh ve 1,5 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada HC emisyonu 0,088 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında HC emisyonları tek yakıtlı

gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %1337,5, %1218,2, %1135,23 ve %987,5 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 1,265 g/kWh, %30 için 1,16 g/kWh, pilot yakıt oranının %40 ve %50 olduğu durumda ise 1,087 g/kWh ve 0,957 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada HC emisyonu 0,071 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında HC emisyonları tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %1111,27, %1101,4, %1046,48 ve %935,21 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 0,86 g/kWh, %30 için 0,853 g/kWh, pilot yakıt oranının %40 ve %50 olduğu durumda ise 0,814 g/kWh ve 0,735 g/kWh olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen HC emisyonu değerleri.

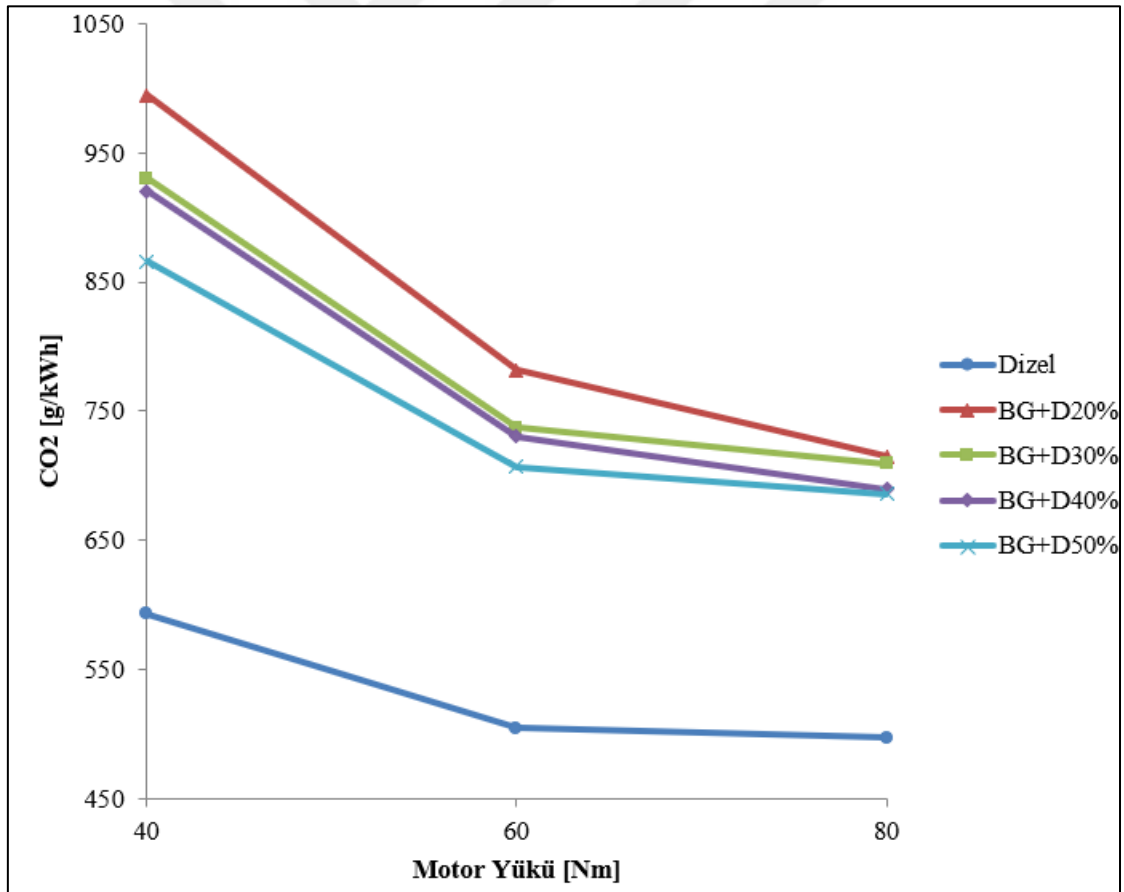
Grafik incelendiğinde tüm motor yükleri için en düşük HC emisyonları tek yakıtlı çalışmada elde edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda ise en düşük değer pilot yakıt

oranının %50 oranında kullanıldığı deneyde, en yüksek değer ise pilot yakıt oranı %20 iken yapılan deneyde elde edilmiştir. Ayrıca çift yakıtlı çalışmalarda motor yükü artarken HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür.

Silindir içi sıcaklıklar ve hacimsel verim motor yüküne bağlı olarak artarken bu durum HC emisyonlarının azalmasında önemli rol oynamıştır. Bununla birlikte gaz yakıtlı çalışmalarda silindir içinde oluşturulan homojen hava/yakıt karışımları, silindir cidarlarının yakınlarında meydana gelen alev sönme bölgeleri nedeniyle tam olarak yakılamadıklarından HC emisyonları artış göstermektedir [66].

3.7.2. Karbondioksit (CO₂) emisyonları

Motorun tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen CO₂ emisyonu değerleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmalarda farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen CO₂ emisyonu değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada CO₂ emisyonu 592,98 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında CO₂ emisyonları, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %67,67, %56,91, %55,24 ve %46,05 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 994,27 g/kWh, %30 ile 930,46 g/kWh, %40 ile 920,55 g/kWh, %50 ile 866,04 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada CO₂ emisyonu 504,81 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında CO₂ emisyonları, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %54,9, %46,01, %44,67 ve %40,08 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 781,98 g/kWh, %30 ile 737,07 g/kWh, %40 ile 730,33 g/kWh, %50 ile 707,13 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada CO₂ emisyonu 497,73 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında CO₂ emisyonları, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %43,67, %42,51, %38,62 ve %37,85 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt ile 715,09 g/kWh, %30 ile 709,3 g/kWh, %40 ile 689,98 g/kWh, %50 ile 686,14 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

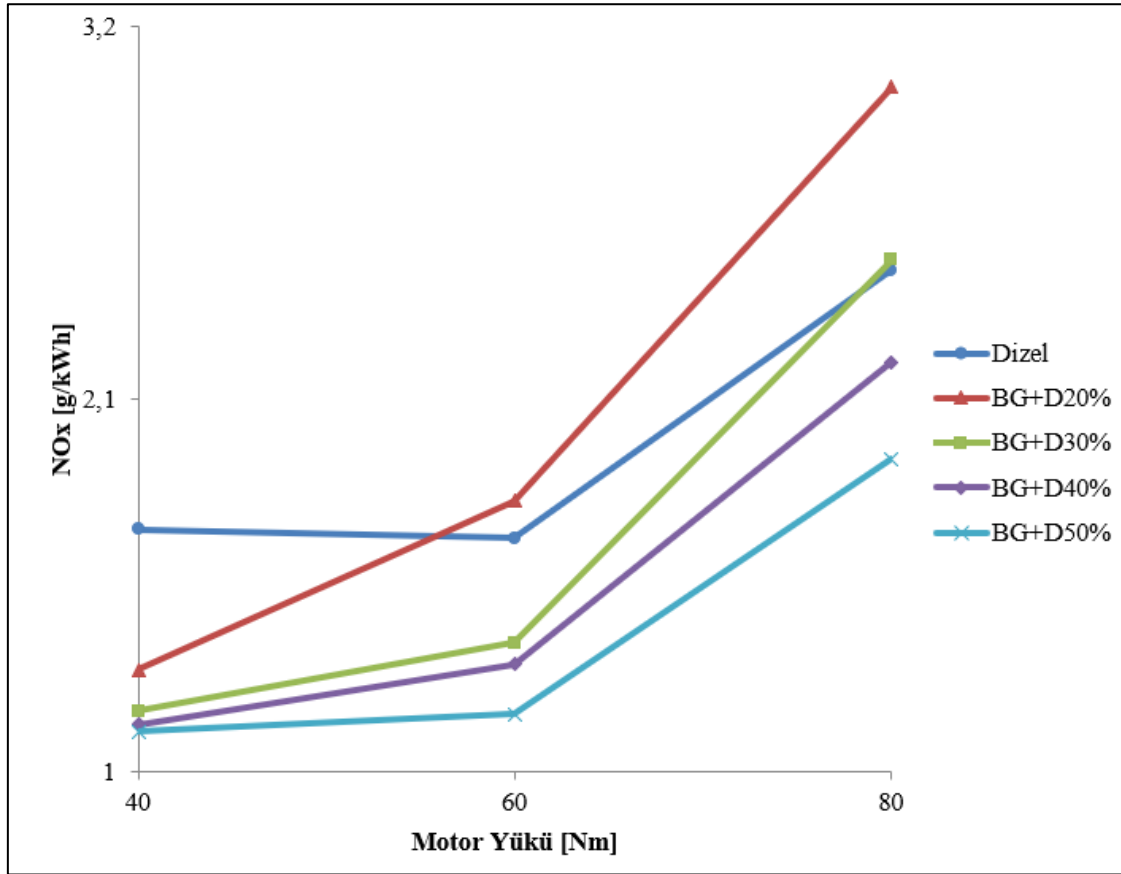
Grafikten anlaşılabacağı üzere en düşük CO₂ emisyonları tüm motor yükleri için tek yakıtlı çalışmada elde edilmiştir. Çift yakıtlı gerçekleştirilen deneylerde en düşük CO₂ emisyonları pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmada, en yüksek değeri ise pilot yakıt oranının %20 olduğu çalışmada meydana gelmiştir. Ayrıca tek ve çift yakıtlı çalışmaların tamamında motor yükü arttıkça CO₂ emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Motor yükünün artmasına bağlı olarak silindir içerisine alınıp oksijen ile yakılan yakıt miktarı artmaktadır. Bu nedenle daha fazla HC, CO₂ ve su buharına dönüşür. Bununla birlikte artan motor yüküne bağlı olarak motor gücünde artmaktadır. Bu durumda CO₂ emisyonlarını hacimsel olarak arttırırken özgül olarak azaltmaktadır. Çift yakıtlı çalışmalarda üretilen CO₂ emisyonları tek yakıtlı çalışmalarda üretilenlere kıyasla daha yüksek çıkmaktadır. Bu artışın temel nedeni biyogazın içeriğinde bulunan CO₂ gazıdır [67].

3.7.3 Azot oksit (NO_x) emisyonları

Bir motorda, yüksek basınç ve sıcaklık altında, havada bulunan N₂ ve O₂ atomları reaksiyona girerek azot oksitleri oluşturur. NO_x esas olarak nitrojen oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) içerir [68].

Şekil 3.11’de tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen NO_x emisyonu değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen NO_x emisyonu değerleri.

40 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada NO_x emisyonu 1,715 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı sırasıyla %20, %30, %40 ve %50 olarak ayarlandığında NO_x emisyonu, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla, %24,2, %31,19, %33,52 ve %34,81 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile 1,3 g/kWh, %30 ile 1,18 g/kWh, %40 ile 1,14 g/kWh, %50 ile 1,118 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

60 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada NO_x emisyonu 1,69 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı %20 olarak ayarlandığında NO_x emisyonu, tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla %6,5 oranında artarken, pilot yakıt oranı %30, %40 ve %50 olduğunda ise NO_x emisyonları sırasıyla %18,34, %22,01 ve %30,77 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile 1,8 g/kWh, %30 ile 1,38 g/kWh, %40 ile 1,318 g/kWh, %50 ile 1,17 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

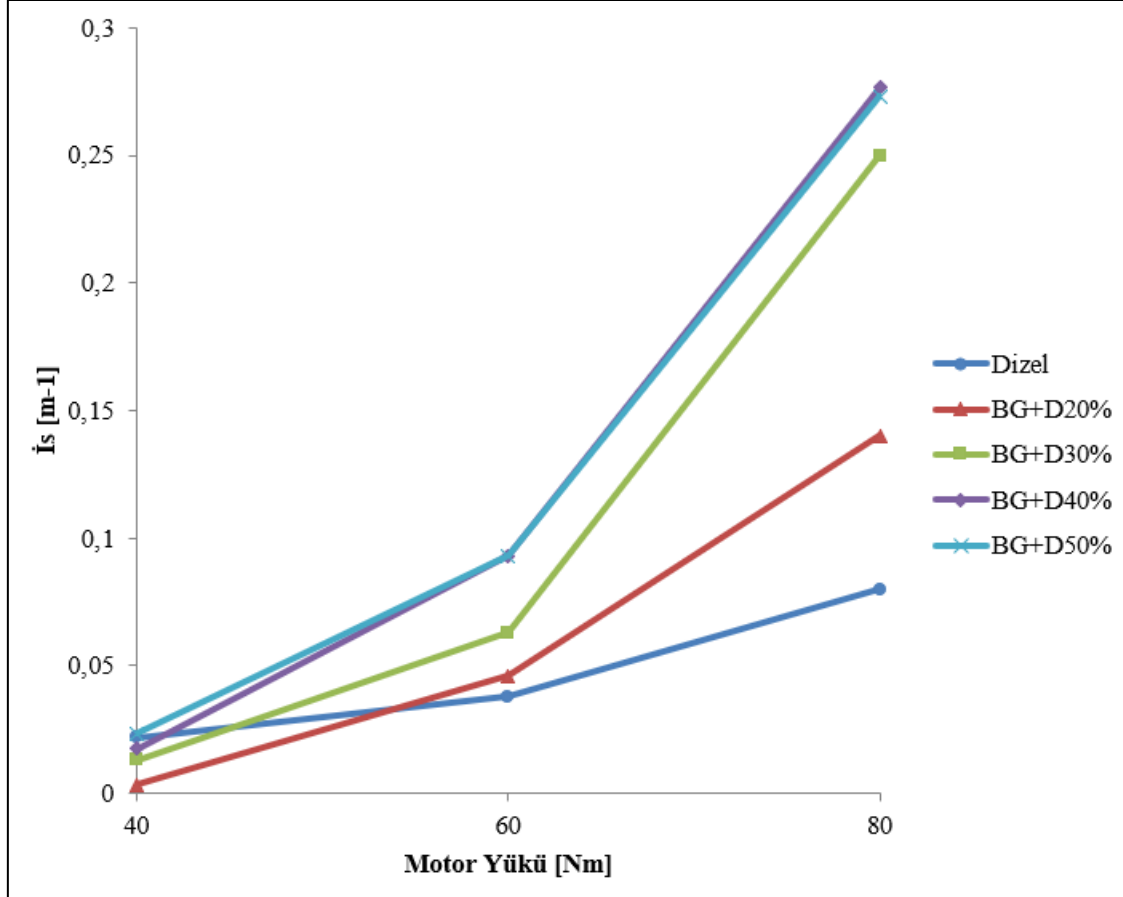
80 Nm yükte tek yakıtlı çalışmada NO_x emisyonu 2,48 g/kWh olarak bulunmuştur. Biyogaz-dizel çift yakıtlı çalışmalarda motora gönderilen pilot yakıt oranı %20 ve %30 olarak ayarlandığında NO_x emisyonları tek yakıtlı gerçekleştirilen çalışmaya kıyasla sırasıyla %21,77 ve %1,21 oranında artarken, pilot yakıt oranı %40 ve %50 olduğunda ise NO_x emisyonları sırasıyla %10,93 ve %22,46 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt ile 3,02 g/kWh, %30 ile 2,51 g/kWh, %40 ile 2,209 g/kWh, %50 ile 1,923 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

Grafik incelendiğinde tek yakıtlı çalışmada en düşük NO_x emisyonunun 60 Nm’de olduğu görülmüştür. Çift yakıtlı çalışmada ise motor yükünün artışı NO_x emisyonunun artmasına neden olurken, pilot yakıt miktarının artmasıyla NO_x emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Çift yakıtlı çalışmada, tüm motor yükleri için en düşük NO_x emisyonları pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmalarda elde edilirken, en yüksek NO_x emisyonları ise pilot yakıt oranının %20 olarak ayarlandığı çalışmalarda oluşmuştur.

Biyogaz içerisindeki CO_2 gazının silindir içi sıcaklıkları düşürmesi ve gaz yakıtlı çalışmalarda hacimsel verimin tek yakıtlı çalışmaya göre daha düşük olması NO_x oluşumunu azaltmıştır. Bununla birlikte gaz yakıtlı çalışmalarda silindir içerisine alınan biyogaz miktarı arttıkça NO_x artmaktadır. Biyogaz/hava homojen karışımının meydana getirdiği kontrolsüz yanma fazında çok fazla gaz yakıtın yanarak basınç artış hızlarını yükseltmesi ve kontrolsüz yanma fazının uzaması NO_x emisyonlarına olumsuz etki yapmaktadır. Motor yüküne bağlı olarak artan NO_x emisyonlarının nedenleri arasında artan silindir içi sıcaklıklar ve hacimsel verim sayılabilir [68].

3.7.4 İis emisyonları

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda meydana gelen difüzyon kontrollü yanma sırasında, yanma odası içerisinde oksijenin yeterince bulunmadığı durumlarda is oluşmaktadır [65]. Şekil 3.12’de tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen is emisyonu değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışmada farklı yük ve pilot yakıt miktarlarıyla ölçülen is emisyonu değerleri.

40 Nm motor yükünde tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmada is emisyonları $0,022 \text{ m}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Pilot yakıt oranının %20, %30 ve %40 olduğu çalışmalarda is emisyonu, tek yakıtlı çalışmaya kıyasla sırasıyla %85, %40,9, %20,45 oranlarında azalarak, %20 pilot yakıt oranı ile $0,0033 \text{ m}^{-1}$, %30 ile $0,013 \text{ m}^{-1}$, %40 ile $0,0175 \text{ m}^{-1}$ olmuştur. Pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmada ise bu değer tek yakıtlı çalışmaya kıyasla %5,9 artış göstererek $0,0233 \text{ m}^{-1}$ değerinde oluşmuştur.

Motor yükü 60 Nm iken tek yakıtla yapılan çalışmada is emisyonları $0,038 \text{ m}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Çift yakıtlı çalışmalarda pilot yakıt oranının %20, %30, %40 ve %50 olduğu çalışmalarda is emisyonu, tek yakıtlı çalışmaya kıyasla sırasıyla %21,05, %65,78, %144,73 ve %144,73 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt oranı ile $0,046 \text{ m}^{-1}$, %30 ile $0,063 \text{ m}^{-1}$ %40 ile $0,093 \text{ m}^{-1}$, %50 ile $0,093 \text{ m}^{-1}$ olmuştur.

80 Nm motor yükünde tek yakıtla gerçekleştirilen deneylerde is emisyonu $0,08 \text{ m}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Çift yakıtlı çalışmalarda pilot yakıt oranının %20, %30, %40 ve %50 olduğu çalışmalarda is emisyonu, tek yakıtlı çalışmaya kıyasla %75, %212,5, %245 ve %241,25 oranlarında artarak, %20 pilot yakıt oranı ile $0,14 \text{ m}^{-1}$, %30 ile $0,25 \text{ m}^{-1}$, %40 ile $0,276 \text{ m}^{-1}$ ve %50 ile $0,273 \text{ m}^{-1}$ olmuştur.

Gaz yakıtlar özelliklerinden dolayı daha az is emisyonu üretme eğilimindedirler. Çift yakıtlı çalışmalarda is emisyonlarının temel kaynağı pilot yakıt olarak kullanılan sıvı yakıtlardır. Düşük yüklerde silindirlere alınan dizel yakıt miktarı az olduğundan çift yakıtlı çalışmalarda düşük yükte azalmaktadır. Bununla birlikte artan yüke bağlı olarak silindirlere gönderilen pilot yakıt ve biyogaz miktarları da artmaktadır. Sıkıştırma oranının düşürülmesi sıvı pilot yakıtın yanmaya başlamasını zorlaştırmaktadır. Sıkıştırma oranının ve hava/yakıt oranının azalması is emisyonlarında artış meydana getirir [69].

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan çalışmaya dair sonuçlar karşılaştırılarak, sonuçların iyileştirilebilmesi için gereken bazı öneriler verilmiştir.

4.1. Sonuçlar

Common-Rail püskürtme sistemine sahip, dört zamanlı, dört silindirli ve turbo şarjlı sıkıştırma ile ateşlemeli bir motor kullanılarak yapılan bu tez çalışmasının amacı, yenilenebilir yakıtların en önemlilerinden birisi olan biyogazın, miktarının değiştirilerek sıkıştırma oranı düşürülmüş, çift yakıtlı bir motorda kullanılmasıyla, zararlı emisyonların ve motor performans karakteristiklerinin incelenmesidir. Yakıt kaynağı olarak dizel yakıtı ve biyogazın kullanıldığı bu çalışmada biyogaz, %60 oranında CH₄, %40 oranında CO₂ gazlarından oluşturulmuş ve biyogaz/hava karışımının tutuşturulabilmesi için motora pilot yakıt olarak dizel yakıt gönderilmiş, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- %20 ile %50 arasında %10'luk artışlarla belirlenen pilot yakıt oranlarıyla, çift yakıt kullanılarak yapılan deneylerde, ÖYT'lerin yük miktarı ve pilot yakıt miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Tüm deneyler incelendiğinde, tüm motor yüklerinde en düşük ÖYT tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda ise tüm yüklerde en yüksek ÖYT değeri pilot yakıt oranının %20 olduğu çalışmada elde edilirken, en düşük ÖYT ise pilot yakıt oranının %50 olarak ayarlandığı çalışmada hesaplanmıştır.
- ÖET grafiği incelendiğinde, sonuçların ÖYT grafiğiyle benzerlik gösterdiği görülmüştür. Tek yakıtlı çalışmada elde edilen ÖET değerleri, çift yakıtlı çalışmaya kıyasla daha düşük çıkmıştır. Çift yakıt kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda ise motor yükü artışıyla tüketilen enerji miktarının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca çift yakıtlı çalışmalarda, en yüksek ÖET değeri pilot yakıt oranının %20, motor yükünün ise 40 Nm olduğu deneylerde oluşurken, en düşük değer ise pilot yakıt oranının %50 motor yükünün ise 80 Nm olduğu çalışmada elde edilmiştir.
- Tek yakıtla gerçekleştirilen deneylerde 80 Nm motor yükü değerinde, en yüksek hacimsel verim elde edilmiştir. Ayrıca, hacimsel verim, tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmalar için tüm motor yüklerinde, çift yakıtlı çalışmalardan

yüksek olmuştur. Pilot yakıt oranının %20 motor yükünün ise 40 Nm olduğu çalışmada, hacimsel verim en düşük değerde meydana gelmiştir. Tüm pilot yakıt miktarlarında, motora gönderilen dizel miktarı sabit tutulup yük değeri arttırıldığında ise hacimsel verim artış göstermiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda tüm yüklerdeki hacimsel verim değerleri incelendiğinde pilot yakıt oranının %50 olduğu durumun en uygun çalışma şartı olduğu görülmüştür.

- Isıl verim sonuçları hesaplandığında, en yüksek ısı verimin tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmada elde edildiği görülmüştür. Çift yakıtlı çalışmalarda ise en yüksek ısı verim, pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmada elde edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalarda pilot yakıt miktarının artmasıyla ısı verimin arttığı görülmüştür. Ayrıca, çift yakıtlı çalışmalarda motor yükünün artışı da ısı verimin artmasına neden olmuştur.
- Deneylerde ölçülen egzoz gazı sıcaklıkları karşılaştırıldığında, tek yakıtlı çalışmadaki veriler çift yakıtlı çalışmadaki tüm pilot yakıt oranlarına kıyasla daha düşük olmuştur. Hem tek yakıtlı çalışmada hem de çift yakıtlı çalışmada motor yükünün artmasıyla sıcaklıkların arttığı gözlemlenmiştir. Çift yakıtlı çalışmada ölçülen verilerde en yüksek egzoz gazı sıcaklığı %50 pilot yakıt oranıyla 80 Nm motor yükünde oluşmuştur.
- Deneylerde ölçülen silindir içi sıcaklıklar incelendiğinde, tüm motor yüklerinde en yüksek sıcaklıkların tek yakıt kullanılan çalışmalarda elde edildiği görülmüştür. Silindir içi sıcaklık grafikleri incelendiğinde, biyogazın önemli bir bileşeni olan CO₂ oranının artması yanmayı kötüleştirerek sıcaklıkların düşmesine neden olmuştur.
- En düşük HC emisyonları, tüm motor yükleri için tek yakıtla gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmalar göz önüne alındığında, en düşük değerler pilot yakıt oranının %50 oranında kullanıldığı deneylerde, en yüksek değerler ise pilot yakıt oranı %20 iken yapılan deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca, çift yakıtlı çalışmalarda motor yükü artarken HC emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Çift yakıtlı çalışmalarda HC emisyonu için en uygun çalışma şartı pilot yakıt oranının %50 olduğu zamandır.
- Tüm motor yükleri için en düşük CO₂ emisyonları tek yakıtlı çalışmalarda elde edilmiştir. Çift yakıtla gerçekleştirilen deneylerde en düşük CO₂ emisyonları

pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmalarda, en yüksek ise pilot yakıt oranının %20 olduğu çalışmada oluşmuştur. Ayrıca çift yakıtlı çalışmalarda tüm pilot yakıt miktarları için, motor yükü arttıkça CO₂ emisyonları azalmıştır.

- NO_x emisyonları incelendiğinde, motor yükünün artması, hem tek yakıtlı hem de çift yakıtlı çalışmalarda NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur. 40 Nm için en düşük emisyonlar pilot yakıt oranının %40 olduğu çalışmada oluşurken, en yüksek ise tek yakıtlı gerçekleştirilen deneylerde oluşmuştur. 60 Nm ve 80 Nm için ise en düşük emisyonlar %50 pilot yakıtlı, en yüksek emisyonlar ise %20 pilot yakıt kullanılan çalışmalarda elde edilmiştir. Tüm yüklerdeki tek yakıtlı ve çift yakıtlı çalışma şartları incelendiğinde çift yakıtlı çalışmada NO_x emisyonlarında gözle görülür azalmalar elde edilmiştir.
- 40 Nm motor yükü için yapılan deneylerde en yüksek is emisyonları çift yakıtlı çalışmada pilot yakıt oranının %50 olduğu çalışmada olmuştur. Tek yakıtlı çalışmalar için yapılan deneylerde ise is emisyonlarının %5,9 azalmıştır.
- Pilot yakıt miktarının %50 olduğu koşulda elde edilen veriler is emisyonu haricinde dikkate değer şekilde iyileşmiştir. Özellikle NO_x emisyonlarında önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Sıkıştırma oranı düşürülmüş biyogaz/dizel çift yakıtlı motora gönderilecek en uygun yakıt karışımı oranının %50 biyogaz, %50 dizel yakıt olduğu görülmüştür.

4.2. Öneriler

- Deneylerde kullanılan motorun sıkıştırma oranı 16,9'dur. Sıkıştırma oranı değiştirilerek motor performansında ve egzoz emisyonlarında meydana gelen değişimler incelenebilir.
- Deneyler, sıkıştırma ile ateşlemeli motorun en yüksek torku ürettiği 1750 d/d'de sabit tutularak, ve motor yükü değiştirilerek yapılmıştır. Her bir motor yükünde farklı devirlerde deneyler gerçekleştirilerek, sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Püskürtme zamanları değiştirilerek, çift yakıtlı çalışmaların sonuçları incelenebilir.
- Biyogazın içeriğindeki CH₄ ve CO₂ oranları değiştirilerek, egzoz emisyonlarının ve motor performansının iyileşmeleri sağlanabilir.
- Çift yakıtlı çalışmada yanma analizi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Türkcan A. (2013), “Direkt Püskürtmeli HCCI Bir Motorda Püskürtme Parametrelerinin Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli
- [2] Dhir A., Rosha P., Mohapatra S.K. (2018), “Influence of gaseous fuel induction on the various engine characteristics of a dual fuel compression ignition engine: A review.”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.82, p. 3333-3349
- [3] Yılmaz I.T., Gümüş M. (2017), “Biyogaz-dizel çift yakıtlı dizel motor üzerine bir araştırma”, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 32:3, p. 919-927
- [4] Saha U.K., Sahoo N., Sahoo B. (2012), “Diagnosing the effects of pilot fuel quality on exergy terms in a biogas run dual fuel diesel engine.”, International Journal of Exergy, vol.10:1, p. 77-93
- [5] Lu X., Shan X., Qian Y., Sun S., Ju D. (2017), “Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines.”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 69, p.50-58
- [6] Cha S.J., Lim C., Kim D., Song C., Kim J., Han J. (2015), “Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases”, Applied Energy, vol. 139: p. 17-29
- [7] Guo H., Birouk M., Yousefi A. (2018), “An experimental and numerical study on diesel injection split of a natural gas/diesel dual-fuel engine at a low engine load.”, Fuel, vol. 212, p. 332-346
- [8] Yao C., Wei H., Pan W., Han G., Dou Z., Wu T., Liu M., Wang B., Gao J., Chen C., Shi J. (2017), “Experimental investigations of the effects of pilot injection on combustion and gaseous emission characteristics of diesel/methanol dual fuel engine.”, Fuel, vol. 188, p. 427-441
- [9] Verma S., Das L.M., Bhatti S.S., Kaushik S.C. (2017), “A comparative exergetic performance and emission analysis of pilot diesel dual-fuel engine with biogas, CNG and hydrogen as main fuels.”, Energy Conversion and Management, vol.151, p.764-777

- [10] Fischer M., Jiang X. (2015), "An investigation of the chemical kinetics of biogas combustion.", *Fuel*, vol. 150, p. 711-720
- [11] Abdul Rahman K., Ramesh A. (2017), "Effect of reducing the methane concentration on the combustion and performance of a biogas diesel predominantly premixed charge compression ignition engine", *Fuel*, vol. 206: p. 117-132
- [12] Stanley A.M., Stanley D.M., Dadu D.W., Abah A.M. (2013), "Appraising the combustion of biogas for sustainable rural energy needs.", *African Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 7(6), p. 350-357
- [13] Nghiem L., Wickham R., Ohandja D.G., (2017), "Enhanced biogas production and performance assessment of a fullscale anaerobic digester with acid phase digestion.", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 124, p. 162-168
- [14] Khanal S.K., Surendra K.C., Takara D., Hashimoto A.G. (2014), "Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.31, p. 846-859
- [15] Zieminski K., Frac M. (2012), "Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms", *African Journal of Biotechnology*, vol. 11:18, p. 4127-4139
- [16] Bharathiraja B. (2016), "Biohydrogen and Biogas – An overview on feedstocks and enhancement process.", *Fuel*, vol. 185, p. 810-828
- [17] Gonzalez-Salazar M.A., Venturini M., Poganietz W.R., Finkenrath M., Kirsten T., Acevedo H., Spina P.R. (2016), "Development of a technology roadmap for bioenergy exploitation including biofuels, waste-to-energy and power generation & CHP.", *Applied Energy*, vol. 180, p. 338-352
- [18] Smyth B.M., Hakawati R., McCullough G., De Rosa F., Rooney D. (2017), "What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?", *Applied Energy*, vol. 206, p. 1076-1087
- [19] Eryaşar A., Koçar G. (2009), "Biyogazın Mevcut Isıtma Sistemlerinde Kullanılabilme Olanakları.", *Mühendis ve Makine*, vol. 50, p. 590

- [20] Barik D., Satapathy A.K, Murugan S. (2015), “Combustion analysis of the diesel–biogas dual fuel direct injection diesel engine – the gas diesel engine”, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 38:3, p. 259-266
- [21] Jiang C., Liu T., Zhong J. (1989), “A Study on Compressed Biogas and Its Application to the Compression Ignition Dual Fuel Engine”, *Biomass*, vol. 20, p. 53-59
- [22] Jaramillo J., Zapata J., Bedoya I. D. (2017), “Interactive control of combustion stability and operating limits in a biogas-fueled spark ignition engine with high compression ratio.”, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 1, p. 1-14
- [23] Nathan S.S, Mallikarjuna J.M., Ramesh A. (2010), “An experimental study of the biogas–diesel HCCI mode of engine operation”, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, p.1347-1353
- [24] Senthilkumar K., Vivekanandan S. (2016), “Investigating the Biogas as Secondary Fuel for CI Engine.”, *International Journal of Applied Environmental Sciences*, vol. 11, p. 155-163
- [25] Ambarita H. (2017), “Internal combustion engine run on biogas is a potential solution to meet Indonesia emission target.”, *1st Nommensen International Conference on Technology and Engineering*, vol. 237
- [26] Aktaş A., Sekmen Y. (2008), “Biyodizel ile Çalışan Bir Dizel Motorda Yakıt Püskürtme Avansının Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 23:1, p. 199-206
- [27] Özdalyan B., Vural E., Özer S. (2011), “Tek Silindirli Bir Dizel Motorunda Değişik Püskürtme Zamanlaması Değerlerinin Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması”, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol. 3:3, p. 1-10
- [28] Özener O. (2013), “Dizel Motorlarında Pilot Püskürtmenin Performans ve Emisyon Açısından Optimizasyonu”, *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*
- [29] Sürmen A., Karamangil İ., Arslan R. (2004) “Motor termodinamiği”, *Aktüel Yayınları, İstanbul*.

- [30] Solak S. (2013), “Biyodizel/LPG çift yakıtlı bir motorda püskürtme zamanının performans ve emisyonlara etkisi.”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Bayık M. (2010), “Dizel Yakıtına İzobütanol İlavesinin Performans ve Emisyonlara Etkisi.”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [32] Dere M.A. (2012), “Çift Yakıtlı (Dizel+Hidrojen) Bir Dizel Motorunda Enerji ve Ekserji Analizi.”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [33] Saraç S. (2011), “Çift Yakıtlı Bir Dizel Motorda LPG/Biyodizel Oranının Performans ve Emisyonlara Etkisi.”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [34] Sharma M.P., Dwivedi G. (2013), “Cold Flow Behaviour of Biodiesel-A Review.”, International Journal of Renewable Energy Research, vol.3, no. 4
- [35] Thilagan J. (2014), “Low flash point of Diesel in India and fire accidents in transport vehicles -An analysis.”, International Journal of Green and Herbal Chemistry, vol. 3:2, p. 532-535
- [36] Department of Mechanical Engineering (2017-2018), “Testing of Fuels: Flash and Fire Point.”, Indian Institute of Technology New Delhi
- [37] Han M. (2013), “The effects of synthetically designed diesel fuel properties–cetane number, aromatic content, distillation temperature, on low-temperature diesel combustion.”, Fuel, vol. 109, p. 512-519
- [38] Soh L., Leggieri P.A., Senra M. (2018), “Cloud point and crystallization in fatty acid ethyl ester biodiesel mixtures with and without additives.”, Fuel, vol. 222, p. 243-249
- [39] Hansen A.C., Yuan W., Zhang Q. (2004), “The specific gravity of biodiesel fuels and their blend with diesel fuel.”, Article, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Illinois at Urbana- Champaign
- [40] Ickes M.A (2009), “Fuel property impact on a premixed diesel combustion mode.”, Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

- [41] Yücel N. (2016), “The performance and emission studies of biodiesel produced from tea seed oil and its blend with diesel fuel.”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [42] Sertçelik N. (2010), “Çift yakıtlı dizel motorlarda LPG kullanımının performans ve emisyonu etkisi.”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [43] Azi H. (2017), “Bir dizel motorunda hint yağı biyodizeli ve dietil eter kullanımının motor performansına ve emisyonlara etkisinin araştırılması.”, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [44] Sezer İ., Bilgin A. (2012), “Farklı Çalışma Koşullarında Dietil Eter-Dizel Yakıt Karışımlarının Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi.”, TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, vol. 53, p. 42-49
- [45] Ismail S., Feroskhan M. (2017), “A review on the purification and use of biogas in compression ignition engines.”, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, vol. 14:3, p. 4383-4400
- [46] Ibrahim M.M, Narasimhan J.V, Ramesh A. (2015), “Comparison of the predominantly premixed charge compression ignition and the dual fuel modes of operation with biogas and diesel as fuels”, Energy, vol. 89, p. 990-1000
- [47] Barik D., Murugan S. (2016), “Experimental investigation on the behavior of a DI diesel engine fueled with raw biogas diesel dual fuel at different injection timing”, Journal of the Energy Institute, vol. 89, p. 373-388
- [48] Huang Z., Fang Q., Fang J., Zhuang J. (2012), “Influences of pilot injection and exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions in a HCCI-DI combustion engine.”, Applied Thermal Engineering, vol. 48, p. 97-104
- [49] Ambarita H. (2017), “Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode.”, Case Studies in Thermal Engineering, vol. 10, p.179-191
- [50] Barik D., 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, vol. 72, p. 760-771

- [51] Bora B.J., Saha U.K. (2016), "Experimental evaluation of a rice bran biodiesel e biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios.", *Renewable Energy*, vol. 87, p.782-790
- [52] Pilusa T.J., Mollagee M.M., Muzenda E. (2012), "Reduction of Vehicle Exhaust Emissions from Diesel Engines Using the Whale Concept Filter.", *Aerosol and Air Quality Research*, vol.12, p. 994-1006
- [53] Deb, M., Sastry, G.R.K., Bose, P.K., Banerjee, R. (2015), "An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation.", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40:27, p. 8586-8598
- [54] Ismail S. ve Feroskhan M. (2016), "Investigation of the effects of biogas composition on the performance of a biogas–diesel dual fuel CI engine.", *Biofuels*, vol. 7 No.6, p. 593-601
- [55] Ismail S., Feroskhan M., Reddy M.G., Teja A.S (2018), "Effects of charge preheating on the performance of a biogas-diesel dual fuel CI engine.", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, p.330-337
- [56] Barik D., Murugan S. (2014), "Simultaneous reduction of NO_x and smoke in a dual fuel DI diesel engine.", *Energy Conversion and Management*, vol.84, p. 217-226
- [57] Duc P.M., Wattanavichien K. (2007), "Study on biogas premixed charge diesel dual fuelled engine.", *Energy Conversion and Management*, vol.48, p. 2286-2308
- [58] Pulkrabek W.W. (2003), "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine.", Prentice Hall, New Jersey
- [59] Pianthong K., Sombatwong P., Thaiyasuit P. (2013), "Effect of Pilot Fuel Quantity on the Performance and Emission of a Dual Producer Gas Diesel Engine.", *Energy Procedia*, vol. 34, p. 218-227
- [60] Ramesha D.K., Bangari A.S., Rathod C.P., Samartha C.R. (2015), "Experimental investigation of biogas-biodiesel dual fuel combustion in a diesel engine.", *Department of Mechanical Engineering, University Visvesvaraya College of Engineering, Bangalore University, K.R.Circle, Bangalore*, vol. 1, p. 12-20

- [61] Subramanian K.A., Kalsi S.S. (2017), “Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine.”, *Renewable Energy*, vol.106, p. 78-90
- [62] Yılmaz İ.T. (2015), “Düşük ısı kayıplı bir dizel motorda çift yakıt (Biyogaz-Dizel) kullanımının performans ve emisyonlara etkisi.”, Doktora tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [63] Yoon S.H., 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*, vol.92, p. 992-1000
- [64] Sharaf J. (2013), “Exhaust Emissions and Its Control Technology for an Internal Combustion Engine.”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol.3(4), p. 947-960
- [65] Azam A., Iqbal A., Ali S. (2016),” Emissions from Diesel Engine and Exhaust After Treatment Technologies.”, 4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development
- [66] Mahla S.K., Singla V., Sandhu S.S, Dhir A. (2018), “Studies on biogas-fuelled compression ignition engine under dual fuel mode.”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, p. 9722-9729
- [67] Shameer P.M., Ramesh K., Sakthivel R., Purnachandran R. (2017), “Effects of fuel injection parameters on emission characteristics of diesel engines operating on various biodiesel: A review.”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.67, p. 1267-1281
- [68] Yamada H., Misawa K., Suzuki D., Tanaka K., Matsumoto J., Fujii M., Tanaka K. (2011),” Detailed analysis of diesel vehicle exhaust emissions: Nitrogen oxides, hydrocarbons and particulate size distributions.”, *Proceedings of the Combustion Institute*, vol.33, p. 2895-2902
- [69] Barik D., Murugan S. (2016), “Effects of diethyl ether (DEE) injection on combustion performance and emission characteristics of Karanja methyl ester (KME)–biogas fueled dual fuel diesel engine.”, *Fuel*, vol.164, p. 286-296

EKLER

EK-1 - TABLO 1. Toplam Hata Oranları

Ölçülen Parametreler	Ölçüm Araçları	Hassasiyet (%)	Hata Oranı
Tork	Yük Sensörü	0,25	0,27%
	Yük İndikatörü	0,1	
Güç	Tork	0,27	0,37%
	Hız Sensörü	0,25	
Özgül Yakıt Tüketimi	Yakıt Ölçüm Sistemi	0,1	0,24%
	Gaz Akış Ölçer	0,1	
	Güç	0,2	
Özgül Enerji Tüketimi	Yakıt Ölçüm Sistemi	0,1	0,24%
	Gaz Akış Ölçer	0,1	
	Güç	0,2	
Hacimsel Verim	Hava Akış Ölçer	1	1%
Isıl Verim	Gaz Akış Ölçer	1	1,02%
	Güç	0,2	
Silindir İçi Sıcaklıklar	Silindir İçi Basınç Sensörü	0,05	1,42%
	Krank Enkoder	1	
	Hava Akış Ölçer	1	
HC	Hava Akış Sensörü	1	1%
	HC Sensörü	0,0001	
CO₂	Hava Akış Sensörü	1	1%
	CO ₂ Sensörü	0,01	
NO_x	Hava Akış Sensörü	1	1%
	NO _x Sensörü	0,0001	
İs	Hava Akış Sensörü	1	1%
	İs Sensörü	0,01	

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mustafa YAVUZ

Doğum Yeri & Tarihi : Gaziantep / 10.07.1990

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yabancı Diller: İngilizce (Writing & Reading– Advance ; Speaking – Upper Intermediate)

İş Deneyimi

Stajlar : Anadolu Isuzu Otomotiv Sanayi ve Tic. A.Ş (09.2015 – 01.2016)

Çalıştığı Kurumlar : Köksan Pet ve Plastik San. Tic. A.Ş (02.2019 – 07.2019)

İletişim

E-Posta Adresi : mustafayavuz.eng@gmail.com