

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA BİYOGAZ YANMASININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMİNE TUĞBA TAŞCI

AĞUSTOS, 2022

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA BİYOGAZ YANMASININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMİNE TUĞBA TAŞCI

DANIŞMAN

DOÇ. DR. YASİN KARAGÖZ

AĞUSTOS, 2022

BİLDİRİM

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt ederim.

Emine Tuğba Taşçı

Danışmanlığını yaptığım işbu tezin tamamen öğrencinin çalışması olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığını taahhüt ederim.

Doç. Dr. Yasin Karagöz

ONAY

Emine Tuğba Taşçı tarafından hazırlanan “İçten Yanmalı Motorlarda Biyogaz Yanmasının İncelenmesi” başlıklı bu yüksek lisans tezi İstanbul Medeniyet Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Üyeler:

Prof. Dr. Erkan ŞAHİNKAYA
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Şaban PUSAT
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/08/2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca deneyimlerini, mesleki birikimini ve desteğini hiç esirgemeyen, her daim yol gösteren ve motive eden pek kıymetli saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ'e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Teşekkürlerin en büyüğünü kendisine ettiğim, her anımda yanımda olan, maddi ve manevi desteği ile bana güç veren, yol göstericim değerli eşim Ufuk Necat TAŞÇI'ya, bu süreçte onun vaktinden harcadığım her saniye için özür dilediğim, sürece çok güzel uyum sağlayarak doğduğu günden beri minik varlığıyla bana en büyük gücü veren, süreci kolaylaştıran biricik kızım Betül Dila TAŞÇI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her anımda yanımda olan, maddi ve manevi tüm desteklerini sonuna kadar hissettiren, haklarını asla ödeyemeyeceğim en büyük şanslarım; kıymetli annem Özgen ORAL'a ve kıymetli babam Nevzat ORAL'a, sevgili kardeşlerim Eyüp Emre ORAL'a ve Mahmut Sami ORAL'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Temmuz, 2022

Emine Tuğba TAŞÇI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
BÖLÜM I	1
BİYOGAZ	1
1.1. Biyogaz, Önemi ve Özellikleri	1
1.2. Biyogazın Oluşumu	3
1.3. Biyogazın Küresel Isınmaya ve Sera Gazına Etkileri	4
1.3.1. Küresel Isınma Potansiyeli	4
1.4. Biyogazın Avantajları	7
1.5. Biyogazın Dezavantajları	9
BÖLÜM II	11
MOTORLAR	11
2. Motorlar ve Biyogaz	11
2.1. Buji Ateşlemeli Motorlarda Biyogaz Kullanımı	11
2.2. Biyogaz Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlar	15
2.3. Biyogaz Yakıtlı Dizel Motorlar	17
2.4. Çift Yakıtlı Motorlar	18
BÖLÜM III	22
MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1. Deney Ekipmanları	22
3.2. Deney Düzeneği	28
3.3. Deneysel Çalışmalar	30
BÖLÜM IV	31
BULGULAR VE TARTIŞMA	31
4.1. HC Emisyonları	32
4.2. NO _x Emisyonları	32
4.3. CO Emisyonları	33
4.4. Özgül Enerji Tüketimi	34
4.5. Küresel Isınma Potansiyeli	34

4.6. Emisyon Vergisi	35
BÖLÜM V	37
SONUÇ ve ÖNERİLER	37
5.1. Sonuçlar	37
5.2. Öneriler	37
KAYNAKÇA.....	38

SİMGE LİSTESİ

°	Derece
°C	Santigrat Derece
Atm	Atmosfer
C/N	Karbon Azot Oranı
dk	Dakika
g	Gram
cc	Santimetre Küp
cm	Santimetre
cm ³	Santimetre Küp
GWh	Gigawatt Saat
h	Saat
J	Joule
K	Kelvin derece
kcal	Kilo Kalori
kg	Kilogram
km	Kilometre
kmol	Kilomol
kPa	Kilopaskal
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt Saat
L	Litre
l	Litre
m	Metre
m ²	Metre Kare
m ³	Metre küp
mA	Miliamper
mg	Miligram
m _i	Kütle Akış Oranı
Mj	Megajoule
mm	Milimetre
nm	Nanometre

Nm ³	Normal Metre Küp
Nm	Newtonmetre
pH	Potansiyel Hidrojen
ppm	Milyonda Bir
rpm	Devir/Dakika
s	Saniye
sec	�zg�l Enerji Tüketimi
S _L	Laminer Alev Hızı [m/s]
ST	Alev Sıcaklığı
T	Sıcaklık
V	Hacim
W	Watt

KISALTMA LİSTESİ

AR-GE	Araştırma Geliştirme
BTDC	Üst Ölü Noktadan Önce
CFC	Kloroflorokarbonlar
CH ₄	Metan
CO	Karbon Monoksit
CNG	Sıkıştırılmış Doğalgaz
CO ₂	Karbon Dioksit
CR	Sıkıştırma Oranı
d/dk	Devir/Dakika
EGR	Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EPA	Çevre Koruma Ajansı
GWP	Küresel Isınmaya Etki Potansiyeli
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
HC	Hidrokarbon
HCN	Hidrosiyanik asit
H ₂ S	Hidrojen sülfür
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homojen Dolgulu Sıkıştırılmalı Ateşlemeli
HCFC	Hidrokloroflorokarbonlar
HFC	Hidroflorokarbon
IC	İçten Yanmalı
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
LNG	Sıvılaştırılmış Doğalgaz
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MBT	En İyi Tork İçin Minimum İlerleme
MN	Metan Numarası
N ₂	Azot
N ₂ O	Nitröz Oksit

NG	Naturel Gaz
NO	Azot Monoksit
NO ₂	Azot Dioksit
NO _x	Azot Oksitler
CH ₄	Metan
CO	Karbon Monoksit
O ₂	Oksijen
OH	Hidroksit İyonu
C	Karbon
PFC	Per Floro Kimyasalları
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici
SI	Kıvılcım Ateşlemeli
THC	Toplam Yanmamış Hidrokarbon
UNEP	Birleşmiş Milletler Çevre Programı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Anaerobik Bölünme Basamaklarının Şematik Gösterimi (Türker, 2008).	3
Şekil 3. 1. Deney Motoru.....	23
Şekil 3. 2. Dinamometre Kontrol Ünitesi	24
Şekil 3. 3. Kontrol Ünitesinden Görünüm	24
Şekil 3. 4. Deneysel Kurulum Resmi	25
Şekil 3. 5. Deney Ölçümleri.....	26
Şekil 3. 6. Deney Tüpü	27
Şekil 3. 7. Deneysel Ölçüm.....	27
Şekil 3. 8. Sıcaklık Ölçümü	27
Şekil 3. 9. Test Odasının Figürlü Gösterimi (Tunçer, 2021).	28
Şekil 3. 10. Elektronik Kontrol Sistemi.....	30
Şekil 4. 1. HC Emisyonları	32
Şekil 4. 2. NO _x Emisyonları	33
Şekil 4. 3.CO Emisyonları	33
Şekil 4. 4.Özgül Enerji Tüketimi	34
Şekil 4. 5. Küresel Isınma Potansiyeli	35
Şekil 4. 6. Emisyon Vergisi	35
Şekil 4. 7. CO ₂ Değerine Göre Emisyon Vergisi	36

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. CO ₂ 'ye Göre Küresel Isınma Potansiyeli Değerleri (IPCC)	6
Tablo 3. 1. Test Motoru Özellikleri (Tunçer, 2021).....	22

ÖZET

Son yıllarda gerek küresel ısınma ve iklim değışikliğı, gerekse de giderek artan petrol fiyatları araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanması hususunda yeni arayışlara sevk etmiştir. Günümüzde içten yanmalı motorlarda yenilenebilir enerji yakıtlarının kullanılmasının önemi giderek artmaktadır. Bu kapsamda, biyogaz yakıtının içten yanmalı bir motorda direkt yakıt olarak kullanılması tez kapsamında incelenmiştir. Yine tez kapsamında, deneysel olarak farklı oranlarda biyogaz kompozisyonunun yanmaya olan etkisi incelenmiştir.

Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel çalışma ile farklı CO₂ / CH₄ oranındaki biyogaz yakıtlarının emisyonlara ve verime etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, açığa çıkan emisyonların Küresel Isınmaya Etki Potansiyeli incelenmiştir. Bu kapsamda, artan CO₂ emisyonu ile yanma kalitesi düşmesine rağmen, küresel ısınma açısından ise olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyogaz, İçten Yanmalı Motorlar, Küresel Isınma Potansiyeli, İklim Değışikliğı.

ABSTRACT

In recent years, both global warming and climate change, as well as increasing oil prices have prompted researchers to seek new ways to use renewable energy sources. Today, the importance of using renewable energy fuels in internal combustion engines is increasing. In this context, the direct use of biogas fuel in an internal combustion engine as a fuel has been examined within the scope of the thesis. Again, within the scope of the thesis, the effect of different biogas composition on combustion was investigated experimentally.

In this context, the effect of biogas fuels with different CO_2 / CH_4 ratios on emissions and efficiency was investigated with the experimental study carried out. In addition, the Effect of the released emissions on Global Warming has been examined. In this context, although the combustion quality decreases with increasing CO_2 emissions, positive results have been obtained in terms of global warming.

Keywords: Biogas, Internal Combustion Engines, Global Warming Potential, Climate Change.

BÖLÜM I

BİYOGAZ

1.1. Biyogaz, Önemi ve Özellikleri

Dünya üzerindeki artan nüfus, sanayileşme, kentleşme ve ihtiyaçlardaki çeşitliliğin artması ile enerji faaliyetleri artmakta ve yeryüzündeki atık madde oranı fazlalaşmaktadır. Diğer taraftan fosil yakıtların giderek azalması, enerjideki dışa bağımlılık gibi pek çok etkenden dolayı ülke yönetimleri alternatif enerji kaynaklarına ve yenilenebilir enerjiye daha fazla yatırım yapma gereksinimi duymaktadır.

Dünya çapında ihtiyaç duyulan enerjinin neredeyse %25'i doğalgaz, %30'a yakını kömür ve yine %30'dan fazlası petrolden elde edilmekteyken geri kalanı ise nükleer enerji, hidro enerji ve yenilenebilir enerjiden elde edilmektedir (Şenol ve ark., 2017). Biyogazın diğer enerji kaynakları ile kıyaslandığında temel avantajlarından birisi çıkan karbondioksitin çevreye olumsuz etkisinin olmadan bitkilerin kullandığı karbondioksit'e eşit olmasıdır. Bu sebeple kirlilik etkisi oluşturmamaktadır.

Dünya'da kullanılan enerji kaynaklarının %86'sını tükenmekte olan enerji kaynakları yani, petrol, kömür ve doğalgaz oluşturmaktadır. Türkiye biyogaz kaynağı olarak kullanılabilen organik ürünler açısından çok zengin bir ülkedir. Maalesef çoğu ham madde olarak kullanılmadan atık olmaktadır.

Biyogaz, biokütlenin anaerobik ortamda birçok bakterinin birlikte çalışması ile çürütülmesi sırasında meydana gelir. Bu bakteriler çürüyebilecek biyokütlenin içerisinde fazla miktarda bulunabilmekte ve uygun ortam koşullarını bulduklarında aktifleşerek çürütme işlemini gerçekleştirmektedirler. Anaerobik ortamda çürütme gözlemlenmesi için uygun koşulların doğada belirmesi özellikle yaz aylarında gerçekleşir, dolayısıyla biyogaz doğada kendi kendisine oluşabilir. Biyokütlenin biyogaza dönüşümü esnasında atıktan elde edilen enerjinin %10-12'si yeni hücrelerin üretiminde kullanılabilir (McCarty, 1964).

Aslanlı'ya (2009) göre biyogaz; "Organik atıkların oksijensiz ortamda fermentasyonu sonucu meydana gelen; renksiz, kokusuz, havadan hafif, parlak mavi bir alevle yanan, oktan sayısı

yaklaşık olarak 110, yoğunluğu 1,21 kg/m³, yanma sıcaklığı 700 °C, alev sıcaklığı ise 870 °C olan bir karışımdır.”

Aynı zamanda biyogaz, ancak 164 °C’de sıvı hale geçebilen ve kolay kolay bozulmayan sabit bir yapıdadır. Bileşiminde organik maddelerin içeriğine bağlı olarak yaklaşık; % 40-70 metan, % 30-60 karbondioksit, % 0-3 hidrojen sülfür ile çok az miktarda azot ve hidrojen bulunan bir gaza dönüştürülebilmektedir. Oksijensiz çürüme ile birlikte biyogaz açığa çıkarken beraberinde organik açıdan zengin gübre de oluşmaktadır. Böylelikle başlangıçta istenmeyen çevresel kirlenici olarak görülen biyokütle, biyogaz gibi kıymetli bir gaza ve çevre dostu bir organik gübreye dönüşmektedir. Biyogaz yanıcı bir gaz olması hasebiyle tükenmekte olan kaynaklara alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

Biyogazın kalorifik değeri yaklaşık 4700-5700 kcal/m³ dir. Bu ısı değeri benzin ve mazotun ısı değerinin yarısına tekabül etmektedir. 1 m³ biyogaz’ın eşdeğeri; 0,62 litre gazyağı, 1,46 kg odun kömürü, 3,47 kg odun, 0,43 kg butan gazı, 12,3 kg tezek ve 4,70 kWh elektrik enerjisidir. 1 m³ biyogaza eşit yakıt miktarları ise; 0,66 litre motorin, 0,75 litre benzin ve 0,25 m³ propandır.

Kılıç’ın (2007) çalışmasında sunulan verilere göre, 1990’larda biyogazdan elektrik enerjisi üretimi dünya çapında 5000 GWh iken, bu rakam 2000’li yıllarda 12048 GWh seviyesine çıkmıştır.

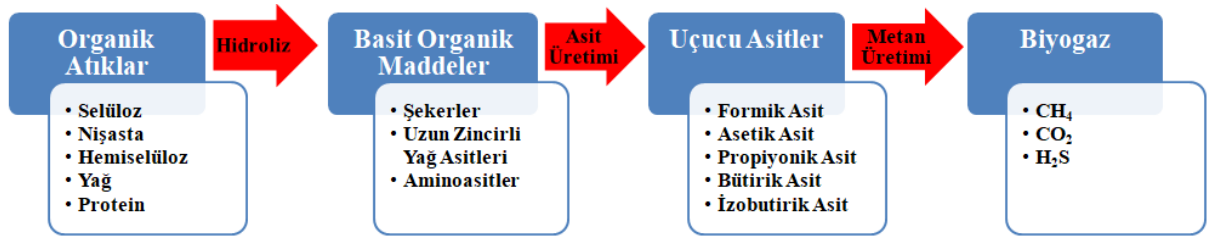
Yılmaz’a (2009) göre her ne kadar biyogazın genel kullanımı ısıtma amaçlı olsa da araç yakıtlarında kullanımı da gittikçe artmaktadır. Örneğin biyogaz üretimi neticesinde Avrupa’da 2015 yılında ağır vasıtalarda kullanılan yakıt maliyetinin yüzde 27’si biyogazla karşılanmıştır.

Deviren ve ark.’nın (2017) çalışması, içerisinde yüzde 20 ila 45 oranında bulunan ve enerji seyreltici işlevi gören CO₂ gazının ayrıştırılmasıyla biyogazın taşıtlarda yakıt olarak kullanılabilirliğini, doğalgazla çalışabilen içten yanmalı motorların da bu kullanım alanına dahil olduğunu göstermiş, fakat biyogazın bu tip kullanımlarda arıtmanın önemine dikkat çekmiştir.

1.2. Biyogazın Oluşumu

Hayvan gübresinin içeriğinde bulunan organik maddeler anaerobik ortamda mikroorganizmalar tarafından sindirilmekte ve üç aşamada metan oluşumu gerçekleşmektedir.

Anaerobik ortamda organik maddelerin ayrışması Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmektedir, en genel halde hidroliz aşaması asit üretimi aşaması ve metan üretimi olmak üzere üç aşamalı bir proses olarak ele alınabilir (Türker, 2008).



Şekil 1.1. Anaerobik Bölünme Basamaklarının Şematik Gösterimi (Türker, 2008).

Birinci aşama hidroliz aşamasıdır. Bu aşama atıkların, mikroorganizmaların salgıladıkları selular enzimler ile çözünür hale dönüştürülmesidir. Uzun zincirli kompleks polisakkaritleri monosakkaritlere, proteinleri peptidlere ve aminoasitlere gibi daha kısa zincirli yapılara dönüştürürler. Bazı kompleks maddeler, örneğin selüloz ve lignin zor hidrolize olur veya hiç hidrolize olmazlar.

İkinci aşama asit oluşturma aşamasıdır. Bu aşamada asit oluşturu bakteriler devreye girerek çözünür haldeki organik maddeleri asetik asit, hidrojen ve karbondioksit gibi daha küçük yapıllı maddelere dönüştürürler. Bu bakteriler anaerobiktir ve asidik ortamda gelişim göstermektedir. Anaerobik bakteriler tarafından metan oluşturan bakterilere uygun ortam sağlanmaktadır.

Üçüncü aşama ise metan oluşumu aşamasıdır. Nihai aşamada bu metan üretici bakteriler asetik asiti parçalayarak biyogaza dönüştürürler. Anaerobik ortamda elde edilen metanın %30’a yakını hidrojen ve karbondioksit gazından, %70’e yakını ise asetik asitin bölünmesinden oluşmaktadır.

Biyogaz oluşumu mikrobiyolojik etkenler ile gerçekleşmekte ve bunun doğal bir sonucu olarak bu mikrobiyolojik organizmaların etkileneceği her türlü koşul biyogaz üretimini de

etkilemektedir. Metan üretimi diğer süreçlere nispetle daha ağır ilerleyen bir süreçtir. Metan oluşumundaki etkili bakteriler çevre koşullarından oldukça fazla etkilenirler. Anaerobik şartlarda çalışan bir biyogaz üretim tesisinde besi maddesinin sıcaklığı, pH'ı, hidrolik bekleme süresi, yükleme hızı, C/N oranı ve katı madde konsantrasyonu önem taşımaktadır. Metanojenik bakteriler sıcaklığa karşı çok hassastırlar. Çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklarda çalışamazlar.

1.3. Biyogazın Küresel Isınmaya ve Sera Gazına Etkileri

Sanayileşen dünyada atık maddeler her geçen gün çoğalmaktadır. Çevreye zarar veren bu atık maddeler, bir diğer taraftan metan gazı salınımı da yapmaktadır. Bu sebepten dolayı atmosferde sera etkisi oluşmakta ve bu da küresel ısınmaya yol açmaktadır. Küresel ısınma nedeniyle barajlar kurumakta, yer altı su kaynakları gün geçtikçe tükenmekte ve kuraklığa sebebiyet vermektedir. Bir yandan ilerleyen teknoloji farklı atık türlerini de beraberinde getirirken, diğer taraftan atık yönetimi ve enerjinin doğru kullanılmasının gerekliliği hasıl olmaktadır.

Ersoy'a (2017) göre biyogazın fosil kaynaklar yerine kullanılması ile CO₂ ve diğer sera gazlarının salınımları azaltılmaktadır. Biyogaz üretimi sırasında oldukça az fosil yakıt tüketilir. Sonuç olarak, evlerin ısınmasında ve araç yakıtları yerine biyogazın kullanımı ile %75 sera gazlarında azalım gerçekleşebilmektedir. Biyogazın önemli bileşeni olan CH₄ aslında bir sera gazıdır ve iklim değişimi açısından irdelendiğinde bir kilogram CH₄ yirmi kilogram CO₂'ye eşdeğer olmaktadır. Biyogaz sistemindeki kaçaklar, yetersiz teknoloji ya da fazla gaz üretiminden oluşan kayıpların önemli çevresel etkileri olmaktadır. Örneğin biyogazda %2'lik metan kaybı nedeniyle yakıt döngüsü esnasındaki metan emisyonunda 10-100 kat bir artışa neden olmaktadır. Biyogazın zenginleştirilmesi sırasında %10'luk bir kayıp ise yakıt döngüsü emisyonunda 50'den 540 kata kadar artış gerçekleşmektedir.

1.3.1. Küresel Isınma Potansiyeli

Bilindiği üzere sera gazları enerjiyi emer, uzaya kaçış hızını yavaşlatır ve bunun bir neticesi olarak dünyamızı ısıtır. Farklı sera gazlarının, bu süreçte farklı etkileri olabilmektedir. Bu fark ise iki temel parametre üzerinden netleşir; sera gazlarının enerjiyi soğutma yetenekleri ve atmosferdeki kaldıkları süre. İklim değişikliğine neden olan bu gazların kullanımı 2016 yılında yapılan Montreal Protokolü'ndeki Kigali Değişikliğinin onaylanmasıyla sınırlandırılmıştır (United Nations, 2016).

Küresel Isınma Potansiyeli, literatürde bilinen genel, kısaltılmış ismiyle; GWP (Global Warming Potential), farklı sera gazlarının küresel ısınmadaki etkisini karşılaştırmak adına geliştirilmiştir. Spesifik anlamda GWP; 1 ton karbondioksit emisyonlarına göre 1 ton gaz emisyonunun belirli bir periyot içerisinde ne kadar enerji emeceğini ölçer. Bu bağlamda GWP ne kadar fazlaysa, belirli bir gazın belirli bir zaman dilimi boyunca karbondioksit kiyasla dünyayı daha fazla ısıtmasıdır. GWP söz konusu olduğunda genelde kullanılan bu süre ise 100 yıldır (United States Environmental Protection Agency, 2022). Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yapılan deklarasyonla CO₂ küresel ısınma potansiyeli (GWP) açısından referans gaz olarak seçilmiştir ve GWP'sinin 1 olarak tanımlanmasında mutabık kalınmıştır. Bu bağlamda ‘‘GWP bir gazın 1 tonunun, 1 ton CO₂ tarafından hapsedilen ısı miktarına bağlı hapsettiği ısı miktarını belirtir’’. Yine Kigali Değişikliği’ne göre HFC üretim ve tüketim raporlamasında standart bir dizi GWP değeri belirlenmesinde mutabık kalınmıştır (UNEP, 2018).

Sera gazlarının küresel ısınmadaki rolünü, sayısal bir endeks (Lashof ve Ahuja, 1990) yoluyla karşılaştırmak adına yapılan çalışmaların temeli Roger ve Stephens’in (1988) ve, Fisher ve arkadaşlarının (1990) yılındaki çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışmaların esas amacı ise Wuebbles’in (1981) yılında ortaya koyduğu Ozon Tükenme Potansiyeli’ne benzer bir biçimde farklı halokarbonların ısınma etkilerini değerlendirmektir.

Global Warming Potential (GWP), Türkçe karşılığıyla; Küresel Isınma Potansiyeli ise doğrudan ve dolaylı etkileri olan kümülatif radyasyon zorlaması anlamını taşır. Bir miktar referans gazla ilgili bir birim gaz kütesinin emisyonundan kaynaklanan belirli bir zaman ufku boyunca oluşan bu gaz; karbondioksittir (IPCC, 1996). Rodhe’nin (1990) ve Lashof ve Ahuja’nın ortaya koyduğu bu kavram IPCC tarafından da onaylanmıştır (Albritton ve arkadaşları., 1995; Schimel ve arkadaşları, 1996; Shine ve arkadaşları, 1990). Daha ileri düzeyde açıklamak gerekirse; bir gaz için GWP, o gazın birim kütle emisyon darbesi tarafından üretilen, belirli bir süre (veya zaman 'ufuğu') boyunca kümülatif, küresel ortalamalı ışımsal zorlamanın karbondioksit tetiklemesiyle oluşan kütle oranıdır.

Tablo 1.1. CO₂'ye Göre Küresel Isınma Potansiyeli Değerleri (IPCC)

Global warming potential (GWP) values relative to CO ₂				
Industrial designation or common name	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
Carbon dioxide	CO ₂	1	1	1
Methane	CH ₄	21	25	28
Nitrous oxide	N ₂ O	310	298	265
Substances controlled by the Montreal Protocol				
CFC-11	CCl ₃ F	3,800	4,750	4,660
CFC-12	CCl ₂ F ₂	8,100	10,900	10,200
CFC-13	CClF ₃		14,400	13,900
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	4,800	6,130	5,820
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂		10,000	8,590
CFC-115	CClF ₂ CF ₃		7,370	7,670

GWP, Yılmaz ve Tosun'un (2014) sadeleştirilmiş açıklamasıyla; "Sera gazı tesiri ile gezegen ısınma etkisinin bir göstergesidir ve küresel ısınma potansiyeli değerleri GWP' si 1 olan karbondioksit (CO₂) referans alınarak" hesaplanır.

Bir gazın GWP değeri ile gaz kütlesinin ton biriminde çarpılmasıyla çıkan değere ton CO₂ eşdeğeri denilir (UNEP).

İklim değişikliği temel anlamda hava durumu modelleri ve gittikçe artan sıcaklıklardaki büyük çaplı, uzun dönemdeki değişimlerdir. Yükselen sıcaklık ve iklimde yaşanan değişim hayatlarımızı ve dünyayı etkilemektedir, bunun temel nedeni ise sera gazlarıdır. İnsan kaynaklı olarak ortaya çıkan CFC, HCFC, HFC ve PFC gibi gazlar güçlü sera gazlarıdır ve iklim değişikliğinde büyük rol oynar. Bu gazların GWP oranı karbondioksite kıyasla binlerce kat daha yüksektir (Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Fosil yakıtların güncel anlamda küresel enerjideki kullanım oranının yüzde 80 olduğu ve bu oranın yüzde 58'i tek başına taşımacılık sektörü tarafından kullanılmaktadır (Nigam ve Singh, 2011). İçten yanmalı motorlarda fosil yakıt kullanım düzeyi dünya genelindeki kullanımın yüzde 25'ine tekabül etmektedir ve dünya geneli sera gazı üretiminin yüzde 10'u yine içten yanmalı motorlar tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle, fosil yakıt tüketimini ve emisyonu azaltmak motor konusunda çalışan araştırmacıların son yıllardaki temel amaçlarından birisi olmuştur (Reitz ve arkadaşları, 2019).

Aynı çalışmalarında, Reitz ve arkadaşları (2019) gelecekte bu sorunun çözümü olarak elektrikli bataryalar ve hibrit araçları, elektrikli araçları işaret etmişlerdir. Bu çalışmalarında da değindikleri üzere, her ne kadar bu alternatifler var olsa da, içten yanmalı motorlar yine gelecek araştırmaların merkezinde yer alacak, bahse konu senaryolarda dahi önemli bir parça olmaya devam edecektir. Bu gerçekten dolayı, kısa ve orta vadede içten yanmalı motorların termal etkinlik düzeyini ciddi maliyetler oluşmadan ve çevresel olumsuz etkileri azaltarak yöntemler geliştirmenin gerekliliğini savunurlar.

Reitz ve arkadaşları (2019) bu içten yanmalı motorlarda yapılması gereken geliştirme çabalarının, sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda önümüzdeki yıllarda çok önemli olduğunu savunmaktadırlar. Bunun ana nedenini ise, taşımacılığın GWP emisyonundaki payının yüzde 10 olmasıyla açıklamaktadırlar. Bu bağlamda motorlardaki bu gerekli iyileştirmeler için tek ve çift yakıtlı motorlar tasarlanmasını tavsiye etmektedirler. Bu çalışmaların ise fosil yakıta bağlılığı azaltacağını, dekarbonizasyon sürecini kolaylaştıracağını ve bu süreçteki en olumlu sonuçların karbondioksit oranı nötr olan biyoyakıtlarla elde edilebileceğini iddia etmektedirler.

1.4. Biyogazın Avantajları

Biyogaz üretim sistemleri pek çok hedefi gerçekleştirmek üzere uygulanmaktadır. Temelde uygun atık yönetimi, yenilenebilir enerji üretilmesi ve bitki besin elementlerinin yönetiminin iyileştirilmesi olarak üç ana kategoride toplanabilmektedir.

Organik kökenli atık ve artık maddelerden enerji elde etme ve atıkların toprağa kazandırılmasında biyogaz teknolojisi önemli rol oynar. Aynı şekilde maliyet açısından çok uygundur ve enerji/gübre kaynağıdır. Atık geri kazanımı sağlamaktadır. Biyogaz üretiminin bir diğer avantajı ise hayvan gübresindeki kokunun ciddi oranda yok olmasıdır. Hayvan gübrelerinden kaynaklanan insan sağlığını ve yeraltı sularını tehdit eden hastalıkların büyük oranda etkinliğinin kaybolmasını sağlamaktadır. Biyogaz üretiminden sonra atıklar yok olmamakta, bilakis çok daha kıymetli bir organik gübre haline gelmektedir.

Gao ve ark. (2019) biyogazın tarımsal atıkları değerlendirme noktasındaki önemine ve çevresel kirliliği azaltmadaki rolüne dikkat çektikleri çalışmalarında, dünyanın en büyük dördüncü enerji kaynağı olarak addedilen biyogazın CO₂ emisyonunda sebep olduğu düşüşü

vurgulamıştır. Özellikle üzerinde durdukları nokta ise biyogazın iktisadi anlamdaki katkıları ve ekolojik anlamdaki faydaları olmuştur.

Ekonomik olarak en temel katkıları ele alındığında, biyogaz ile ısı ve elektrik üretiminin ekonomik kazanç getirdiği, biyogaz üretimi sonrası elde edilen gübrenin daha kolay kullanılabildiği, sera gazını azalttığı, çevreci atık çevrimi sağladığı, daha sağlıklı ve hijyenik yaşam alanları sağlamaya yardımcı olduğu, suni gübreye olan bağımlılığı azalttığı ve dışarıya olan enerji bağımlılığını azalttığı ortaya konmuştur (Öztürk,M., 2005; Tolay vd., 2008).

Gao ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında da görülebileceği üzere, biyogazın en belirgin avantajlarından birisi ekolojik kaynakları korumada üstlendiği roldür. Yine aynı şekilde fosil yakıt tüketimindeki artışın çevresel zararları ve dünyayı burun buruna getirdiği sürdürülebilirlik krizi düşünüldüğünde, biyogaz üzerinde önemle durulması gereken bir alternatif yakıttır.

Bu çalışmada biyogazın yakıt verimliliği, sürdürülebilir elektrik kaynağı üretiminde oynayabileceği potansiyel role dikkat çekilmektedir. Buna ek olarak, insan sağlığı üzerindeki olumlu etkisi teferruatlı şekilde ele alınan biyogazın, aynı şekilde psikolojik olarak da insan sağlığına olumlu katkıları gözler önüne serilmiştir.

Bagher ve arkadaşları (2015), biyogaz enerjisinin avantajlarını çalıştıkları makalelerinde yenilebilir enerji üretimi, maliyetleri azaltmak ve çevresel kaygıları gidermek için biyogaz teknolojisinin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Biyogazın avantajları nedeniyle düzenli depolama alanlarını azalttığını, çevreyi kirletmediğini, çok daha fazla insana iş imkanı sağlayabileceğini, küçük yerlere, çiftliklere bile kurulmasının az maliyetle mümkün olduğunu, daha ucuz olduğunu ve sera gazı etkisini azalttığını araştırmışlardır. Elektrik üretiminde de kullanılabildiği için çok sayıda fabrikada da kullanılabileceğini ve sıkıştırılabildiği için otomotiv için yakıt olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Sadece Büyük Britanya’da biyogazın klasik otomobil yakıtlarının yüzde 17 gibi oranla yerini alması beklenmektedir.

Şenol ve arkadaşları (2017), biyogazın avantajlarını şu şekilde anlatır; temiz enerji kaynağı olması, çevre dostu özelliği, maliyetinin uygun oluşu, gübre kalitesine olan olumlu etkisi, atıkların organik bir gübreye dönüşmesi olarak söylemişlerdir. Buna ek olarak hem ısıtma hem de elektrik üretimi amacıyla kullanılabilmesi, içeriğinde yüzde 95 CH₄ içeriği sayesinde ufak değişikliklerle doğal gazın yerine kullanılabilmesi öne çıkmaktadır.

1.5. Biyogazın Dezavantajları

Biyogazın dezavantajları ve zararları üç temel başlık altında kategorize edilebilir. Bunlar; sağlıkla ilgili, çevresel ve sosyo-ekonomik hususlarla alakalıdır. Fakat, bu dezavantajlar kurulum ve işletim aşamasında alınacak bazı önlemlerin de yardımıyla engellenebilir.

Mesela çevre açısından potansiyel zararları ele alınacak olursa, öne çıkan hususlardan birisi besleme materyalindeki azotun, amonyumun organik formuna dönüşmesidir. Amonyum, amonyak veya nitrata dönüşmektedir. Nitrat ise toprak altına süzülme suretiyle yeraltı sularının kirlenmesine neden olabilmektedir. Yine de mineral ve kompost gübrelere nazaran nitrat kirlenmesi yaklaşık %10-20 daha azdır (Easterly ve Lowenstein,1986; Dalemo ve ark., 1998; Leggett ve ark., 2002).

Bir diğer husus ise yukarıda bahsedildiği üzere sağlıkla ilgili potansiyel zararlardır. Atıkların neden olduğu sağlık problemleri, biyogazın zehirlenme, patlama ve yangın riskine sebebiyet verir (Anon, 2000a; Seadi, 2001; Nelson ve Lamb, 2002; Monnet, 2003). Özellikle belediye atıklarının kullanıldığı tesislerde, tesis çalışanlarına havada bulunan bakteriler nedeniyle sindirim sistemiyle ilgili hastalıklar bulaşabilmektedir (Ivens ve ark., 1997).

Sosyo-ekonomik anlamda oluşabilecek sorunlar ise; biyogaz tesislerinin ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Tesislerin işletilmesinde özen ve teknik bilgi gereklidir. Periyodik bakım çok büyük önem arz etmektedir (Leggett ve ark., 2002). Biyogaz tesisleri, kullanıcıların bulundurduğu hayvan sayısının sabit olduğu varsayımı üzerine kurulmaktadır. Ancak atık miktarında düşüş olursa, başka atıkların kullanılmasıyla bu problem için bir çözüm üretilebilmektedir (Vijayalekshmy, 1985).

Gao ve arkadaşlarının (2019) çalışması her ne kadar biyogazın olumlu etkilerini, daha evvel bahsedildiği üzere ele alıyor olsa da diğer taraftan olumsuz etkilerine dair de bilgiler paylaşmaktadır.

Bu çalışmaya göre ağır metaller, canlı hayvan ve kümes hayvanı yetiştirme sürecinde yem yoluyla yutulur, çoğu doğrudan hayvan metabolizması ile kullanılmaz ve boşaltılmaz. Ağır

metal içeren bu gübreler biyogaz üretimi için kullanıldığında, son biyogaz sindirimi bu zararlı maddeleri içerecektir. Yine aynı çalışmaya göre biyogaz kullanımının yaygınlaşması önündeki en temel engeller; bu işlemi yapacak tesislerin yüksek maliyeti, işletme maliyeti ve yatırımın geri dönüş sürecinin uzunluğu gibi iktisadi sebeplerle de alakalıdır.

Bagher ve arkadaşlarının (2015), yaptıkları araştırmada ise dezavantaj olarak biyogazın safsızlık içerdiği için yakıt olarak kullanıldığında motorların metal parçalarında aşındırıcı etki oluşturabileceğini söylemiştir.

BÖLÜM II

MOTORLAR

2. Motorlar ve Biyogaz

Kırsal kesimlerde ve hayvancılıkla uğraşılan yerleşimlerde organik ve evsel atıklar enerji üretimi için ciddi kaynak oluşturmaktadır. Önemli olan yenilenebilir enerji üretimi için sürdürülebilir bir kaynak kazanma ve çıkan bu atıklardan enerji üretecek sistemleri çevre dostu bir teknolojiyle üretmektir.

Bu doğrultuda içten yanmalı motorların kullanılması gün geçtikçe önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle dizel çevrimine göre çalışan motorlar günümüzde sadece kara taşıtlarında kullanılmayıp; gemilerde, ziraat alanında ve jeneratör sistemlerinde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, gün geçtikçe artan petrol fiyatları ve emisyonlardaki zorlayıcı regülasyonlar, araştırmacıların alternatif bir yakıt arayışına yönelmesini zorunlu kılmıştır (Karagöz, 2016).

2.1. Buji Ateşlemeli Motorlarda Biyogaz Kullanımı

Günümüzde dünyanın karşı karşıya kaldığı en önemli krizlerden birisi olan enerji kaynaklarındaki güncel tedarik sıkıntıları ve bilinçsiz kullanım, çağımız teknolojisinin ve gündelik hayatın, üretim sektörünün vazgeçilmezi olan motor kullanımında da bilim insanlarını farklı alternatif arayışlara ve motor teknolojilerini araştırmaya teşvik etmektedir.

Bilhassa geleneksel yöntemlerdeki (fosil yakıtlar) rezerv sıkıntıları içten yanmalı motorlarda ekolojik alternatif yakıt arayışlarını yoğunlaştırmıştır. Bu bağlamda, kıvılcım ateşlemeli motorlardan, alternatif metotlar ve yakıtlar kullanılarak verim elde etme gayretine girişilmiş, bu süreçte doğal gaz, sıvılaştırılmış petrol gazı gibi yakıtlar öne çıkmış, elektrik üretiminden nakliyeye pek çok farklı alanda kullanıma girmiştir.

Özellikle doğal gaz kullanımı yapan motorların spesifik şartlarda egzoz emisyonlarında azalmaya ve termal verimlilikte yükselişe katkıda bulunduğu müşahade edilmiştir. Hâkim teorik ve pratik uygulamalarda kullanılan halihazırdaki benzinli motor teknolojisinin yerine bir alternatif olarak neşet eden doğal gaz motoru geliştirme projelerinde üç yollu katalitik

konvertör kullanılmış ve önceki araştırma sonuçlarına istinaden yüksek türbülanslı yanma odalarında uygulanagelmıştır.

Günümüzde ise kullanımı her ne kadar az olsa da başka bir alternatif yöntem olarak öne çıkan biyogazla çalışan motorlar da yeni bir araştırma konusu olmaktadır.

Gaz motorlarıyla yapılan ilk deneylerin kökenlerine 19. yüzyılda rastlanmaktadır. Bu dönemde gaz motorları merkezli pek çok deney yapılmış fakat yakıt verimliliğindeki problemler ve güç üretimindeki yetersizlik ana problemler olarak ön plana çıkmıştır, bunun en bilinen örneği ise Belçikalı bir mühendis olan Etienne Lenoir'e ait 1860 yılında üretilen Lenoir motorudur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar içerisinde, farklı karışımlarla üretilen yakıtlarla denemeler yapılmıştır. Örneğin Huang ve Crookes'in (1998) çalışmasında doğal gaz ve karbondioksit içerikli biyogazla tek silindirli kıvılcım ateşlemeli motorda değişken sıkıştırma oranlarıyla testler yapılmıştır. Bu simülasyondaki karbondioksit fraksiyonu hacimce 0'dan yüzde 40'a çıkarılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre karbondioksit varlığının NO_x emisyonlarında artışa sebep olabileceği, ancak daha düşük silindir basıncı uygulanması neticesinde motor gücü ve termal verimliliğin azaldığı saptanmış, yanmamış HC seviyesinin artışı gözlemlenmiştir.

Buna ek olarak, ölçümü yapılan deneyler sonucundaki verilere göre, CO_2 karışımli biyogazla çalışan motorların performansını iyileştirmek için, sıkıştırma oranındaki artışla verimin artabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu husus normal şartlar altında hem NO_x hem de HC emisyonlarında artışa sebebiyet verecek olsa da biyogaz içeriğinde bulunan CO_2 içeriği ile dengelenebilecektir. Bu çalışmanın sonucunda, Huang ve Crookes (1998) biyogaz içeriğinde karbondioksitin motoru çalıştırırken, NO_x emisyonunu azaltıp, sıkıştırma oranının artırılmasını karbondioksitin ana etkisi olarak sunmuşlardır. Ayrıca, silindir basıncı azaltıldığında ve CO_2 fraksiyonu yüzde 3'e yükseldiğinde güç ve fren termal verimliliğinin yüzde 40 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Toplam HC emisyonu ise yakıtta bulunan CO_2 varlığına paralel olarak artmıştır. Yakıtın CO_2 içeriğinin yüksek olduğu durumlarda NO_x değerinin nispeten yüksek olduğu, aynı koşullarda HC ve CO emisyonlarının ise düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Özellikle motor devresi artırıldığında içeriği zayıflatılmış karışımlarda da yoğun emisyonun da azaldığı gözlemlenmiştir.

Bir diğ er çalışmada, Propatham, Ramesh ve Nagalingam (2008) buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak biyogaz kullanımı yapıldığında metan konsantrasyonunun etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda, biyogaz içeriğinde yer alan CO₂ konsantrasyonundaki azalmanın sabit hızlı ve kıvılcım ateşlemeli motor performansı üzerindeki etkisi, emisyon ve yanma hususundaki rolü deneysel olarak incelenmiştir. Biyogaz içeriğindeki CO₂ seviyesini sırayla yüzde 41’den 30’a ve yüzde 20’ye düşürmek için kireç suyu yıkayıcı kullanılmış, testlerde girdabı arttırmak için 1500 rpm sabit hız ve 13:1 sıkıştırma oranı kullanılarak çalışma sınırı çeşitli denklik oran aralıkları ile ele alınmıştır.

Çalışma esnasında, CO₂ seviyesindeki düşüşü müteakiben özellikle zayıf karışımlarda HC emisyonlarında performans ve düşüşü adına önemli gelişmeler gözlemlenmiş, yanma sınırı da genişlemiştir. NO seviyelerinde önemli bir yükselme görülmezken karbondioksit seviyesindeki yüzde 10’luk bir azalma HC seviyelerini düşürmek için yeterli olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın sonucunda, indüklenmiş biyogazda bulunan geliştirilmiş metan konsantrasyonunun performansı önemli  l de iyileşirken, HC emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde biyogazda bulunan CO₂’nin azaltılması, enerji yüklemesi esnasında daha yüksek oranda metan ve oksijen konsantrasyonlarının elde edilmesiyle sonuçlanırken daha çabuk yanma sağladığı ve belirli bir eşdeğerlik oranında daha yüksek güç çıkışı olduğu ile sonuçlanmıştır. HC emisyonundaki azalmanın öncelikli olduğu durumlarda, yakıt içerisindeki CO₂ seviyesinde gözlemlenecek yüzde 30-40 oranındaki bir azalma bile önemli fayda sağlamaktadır ve bu hususta NO seviyesindeki artış yönlü hareketler çok da öneme haiz değildir.

Propatham, Ramesh ve Nagalingam’ın çalışmasına göre ısı verimlilik ve g  , karbondioksit yoğunluğundaki azalma ile birlikte artış göstermiştir. Buna ek olarak, azaltılan CO₂ oranı ile ısı salınım hızında kayda değer bir artış gerçekleşmiş ve geciktirilmış ateşleme zamanlamalarının önemi ortaya çıkmıştır. Ayrıca, karbondioksit ile seyreltmenin azalması da hızlı yanmanın bir sonucu olarak yanma esnasındaki döngü varyasyonlarını azaltmıştır.

Bahse konu bu çalışmadan dört yıl sonra, Propatham, Ramesh ve Nagalingam (2011) bir diğ er çalışmasında ise sıkıştırma oranının biyogazla çalışan buji ateşlemeli motorlardaki performans ve yanma üzerindeki etkisini araştırmıştır.

Bu çalışmanın ilk ayağında, tek silindirli bir dizel motor, biyogazla çalışan buji ateşlemeli bir motor halini alacak şekilde modifiye edilmiştir ve 1500 rpm’de yüzde 25 ve yüzde 100 gaz keleşbeğı açıklığında çeşitli eşdeğer oranlarda test edilmiştir, pek çok farklı sıkıştırma oranı çalışma esnasında denenmiştir. Ateşleme zamanlamasının en iyi tork için minimum ilerleme (MBT) olarak ayarlandığı bu test esnasında farklı sıkıştırma oranları ile performans, emisyon ve yanma özellikleri ele alınarak karşılaştırılmıştır.

Bunun sonucunda, sıkıştırma oranı yükseldikçe, fren ısı veriminin de yükseldiğı saptanmış, sıkıştırma oranının kritik bir değeri olarak kabul edilen 13:1 üzerine çıkması durumunda, fren gücü ve termal verimliliğın ise çok az artış gösterdiği görülmüştür. 13:1 üzerinde uygulanan yüksek sıkıştırma oranlarında ise NO_x, HC ve CO emisyonları artış göstermiştir. Güç ve ısı verim 13:1 ile 15:1 arasındaki sıkıştırma oranı ve 1.08 ile 0.95 arasındaki eşdeğerlik oranı ile en yüksek değerlerine ulaşmıştır.

Bu çalışma neticesinde, Propatham, Ramesh ve Nagalingam gerçek motor çalışma koşullarının sağlandığı bir ortamda biyogazın yalın tekleme yanma sınırının, sıkıştırma oranındaki artışla beraber önemli derecede arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Sıkıştırma oranındaki artışa paralel olarak termal verimlilik ve fren gücünde iyileşme gözlemlenmiştir. 15:1 sıkıştırma oranına sahip tepe güç çıkışı 4,8 kW iken 9,3:1 sıkıştırma oranı 4.4 kW olana göre yüzde on daha güçlüdür. Sıkıştırma oranı 9,3:1’den 15:1’e çıktığında, en yüksek fren termal verimlilik oranı yüzde 23’ten 26,8’e yükselir. Ayrıca, bu orandaki artışla beraber HC ve NO seviyelerinde artış gözlemlenmiş ve bunun başlıca nedeni, yanma hızının yalın sınır genişletilerek sağlanması olarak izah edilmiştir. 0.94 eşdeğerlik oranında sıkıştırma oranı 9.3: 1’den 15: 1’e, HC seviyesi 1184 ppm’den 2000 ppm’e ve NO seviyesi 2125 ppm’den 2650 ppm’e yükselmiştir. Bu bağlamda, genel olarak, sıkıştırma oranındaki artış, performansı artırmak ve biyogaz ile emisyonları azaltmak için istenen düzeydedir.

Shrestha ve Narayanan (2008) ise yaptıkları çalışmada çöp gazının bir yakıt olarak etkisini tartışarak buji ateşlemeli bir motorda etkin bir şekilde güç üretimini tartışmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre, her ne kadar çöp gazının yakıt olarak kullanılması motor performansı ve yanma konusunda metana nispeten kötüleşse de, sıkıştırma oranındaki artış ve kıvılcım zamanlamasının ilerlemesiyle çöp gazı işletiminde metan işletimine göre daha verimli sonuçlar elde etmişlerdir.

Yine aynı çalışmadan elde edilen verilere göre, deponi gazındaki bileşim değişkenlikleri dolayısıyla ortaya çıkan etkiler, stokiyometriye göre fakir ve zengin karışım işleminde daha net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca çöp gazına hacim olarak yüzde 30'a kadar hidrojen eklendiğinde ortaya çıkan sonuçlar ele alınmıştır. Yüzde 5'e kadar yapılan hidrojen ilavelerinde, bilhassa yalın ve zengin limit operasyonlarında performans artışı müşahade edilmiş, operasyonel limit genişlemesi gözlemlenmiştir. Hidrojenin eklenmesi yanma kalitesini artırmış, spesifik olarak yağsız ve zengin karışımlarda deponi gazındaki operasyonların döngüsel varyasyonları azalmıştır.

Karim ve arkadaşlarının (1996) daha eski tarihli bir araştırması ise değişik hidrojen oranlarıyla gerçekleşen deneyleri ele alır. Bu çalışmalarında yanma süresi, alev hızı, güç çıktısı, maksimum silindir basıncı gibi parametreleri inceleyen bu çalışma 10 ve 20 BTDC (üst ölü noktadan önceki açı) için, metanla beraber hidrojenin varlığı durumunda, metan yakıtlı kıvılcım ateşlemeli motorların performansında önemli iyileştirmeler olduğuna dair bir sonuca ulaşır. Zira elde edilen sonuca göre; hidrojen eklenmesi ile artan silindir basıncı nedeniyle ortaya çıkan vuruntu ihtimali, yalnızca metan kullanımına kıyasla daha yüksektir.

Çeper ve arkadaşları (2017) biyogaz ile çalışan buji ateşlemeli motor performanslarına odaklandıkları ve emisyon ölçümü yaptıkları çalışmalarında, biyogaz operasyonlarının fren ısı verimlerinin metana kıyasla daha düşük olduğu tespitini yapmış, literatüre uyumlu veriler elde etmişlerdir.

2.2. Biyogaz Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlar

Metnin içerisinde daha evvel de belirtildiği üzere, biyogaz geliştirmekte olan ülkelerde, içten yanmalı motorlara düşük sera gazı emisyonu avantajıyla bir alternatif olarak belirmiştir. Buna rağmen, motor modifikasyon ve uyarlamalarındaki maliyetleri artırması bağlamında motorlarda kullanılması olumsuz yönlerinden birisi olarak süregelmiştir.

Bu doğrultuda, Faria, Bueno, Ayad ve Belchior'un (2017) Brezilya'da bir kanalizasyon tesisinde üretilen biyogazla çalışan motor jeneratör ünitesinin deneysel performansına dair yaptıkları önem arz etmektedir. Performans özelliklerini tahmin etmek için sıfır boyutlu bir

simülasyon modeli kullanılan bu araştırmada motorun benzer koşullarda simülasyon ve deneysel testlerinin sonuçları karşılaştırılmış ve model valide edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; kırsal alanlarda küçük ölçekli elektrik üretimi için Brezilya gibi gelişmekte olan bölgelerdeki biyogaz kaynakları ile kullanım için uygundur. Biyogaz, bileşimindeki CH_4 nedeniyle yanıcıdır ve bu nedenle doğal gazla çalışan ticari amaçlar için geliştirilen motorlarda kullanılabilir ve bu da kırsal alanlarda kullanımına olan ilginin artmasına neden olur.

Biyokütle türevi bir yakıt olan biyogaz, hava ile daha iyi karışması ve temiz yanma özelliği nedeniyle içten yanmalı (IC) motorlarda kullanılabilir. Barik, Sah ve Murugan'ın (2013) içten yanmalı motorlara yakıt vermek için biyogaz üretimi ve depolaması adına yaptığı araştırmada, depolama yöntemleri ve motor uygulaması dahil olmak üzere biyogaz üretiminin mevcut durumunu ve perspektiflerini gözden geçirmişlerdir. Araştırma sonucunda, biyogaz çift yakıt modunda çalışan dizel motorlarda daha düşük hidrokarbon (HC), duman ve partikül emisyonu rapor edilmiştir.

Çeper ve arkadaşlarına göre (2017) içten yanmalı motorlardaki hava-yakıt oranı, egzoz gazında oluşan NO_x üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve yanma sıcaklığının düşük olduğu durumlarda artan $l(\lambda)$ değerleri NO_x emisyonunda azalmaya sebep olur. Diğer taraftan, egzoz gazı içeriğinde bulunan yanmamış HC konsantrasyonlarının yanı sıra, yakıt açısından fakir karışımlarda çalışırken motorun termal verimlilik ve güç çıkışı da göz önünde bulundurulmalıdır.

Çok zayıf yakıt-hava karışımları, eksik yanma süreçleri ve yavaş yanma hızları nedeniyle motorun sert ve düzensiz çalışmasına neden olabilir. Biyogazı yakıt olarak kullanırken, motorun katalitik konvertörünü kirleten H_2S gibi çeşitli zararlı bileşenlere de dikkat edilmelidir. Biyogaz-hava alevleri daha soğuktur ve karşılık gelen metan-hava alevlerinden daha yavaş yayılır. Bu sonuçların nedeni, nitrojene kıyasla daha büyük ısı kapasitesi nedeniyle yanma hızını azaltan biyogazda CO_2 bulunması olabilir.

2.3. Biyogaz Yakıtlı Dizel Motorlar

Biyogazın kullanımına dair çalışmalar yapılan bir diğer alan ise dizel motorlar olmuştur. Diğer ikincil yakıtlara göre düşük maliyet ve düşük emisyon gibi avantajları bulunan biyogazın aynı zamanda dizel motorlarda daha düşük hidrokarbon, duman ve partikül emisyonu sağladığına dair pek çok çalışma mevcuttur.

Bu kapsamda 1981 yılında Hickson tarafından SI motora dönüştürülen dizel motorlarda biyogazı yakıt olarak kullanmak adına bir çalışma başlatılmış, dizel motorlara göre yüzde 35, benzinli motorlara göre yüzde 40 daha az enerji tüketimi gözlemlenmiştir. Aynı yıl içerisinde Neyeloff ve Cunkel tarafından yapılan bir diğer araştırmada başka bir CFR motoru kullanılmış ve farklı sıkıştırma oranlarında simüle edilmiş biyogaz kullanılmıştır. Yakıt taşımasındaki zorluklar daha düşük ısıtma değeri gibi hususlar bu süreçlerde bildirilen temel engeller olarak öne çıkmıştır. 1983 yılında Thring ise yaptığı çalışma sonucunda biyogazın üretim sahasına yakın olduğu yerlerde cazip olacağı sonucuna varmış ve biyogaz veya doğal gaz gibi gaz halindeki yakıtları metanol veya benzin gibi sıvı yakıtlara dönüştürmeyi önermiştir (Prajapati, 2014).

Bu çalışmalardan yaklaşık 30 yıl sonra, 2013 yılında Ray, K. Mohanty ve C. Mohanty'nin yaptığı bir çalışma organik atıklardan biyogaz üretimi, bileşimi ve IC motorlarında kullanımına odaklanmıştır. Bunun neticesinde CO₂, H₂S ovma için farklı teknikler tartışılmıştır; bunların arasında su ovma, saflaştırma için basit, sürekli ve uygun maliyetli bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Dizel motorlarda alternatif yakıt olarak biyogaz üretimine de önem vermek ve biyogaz CI işletimi için en iyi yakıtın çift yakıtlı olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Aynı çalışmaya göre çift yakıt için biyogazda CO₂ oranındaki düşüş ısı verimi arttırmaktadır. Biyogaz HCCI modunda iken, CO₂'nin varlığı yüksek ısı salınım oranını kontrol etmekte; bu nedenle motor bileşenlerinin dayanıklılığı etkilenmemektedir. Çalışma neticesinde dizel motorlarda alternatif yakıt olarak biyogaz kullanılması önerilmiştir.

Karagöz'ün (2019) farklı CO₂ oranlarında biyogaz yakıtlı emisyon ve performans ölçümleri yaptığı çalışmasında stokiometrik koşulda ve sabit motor devrinde (2800 d/dk) tek silindirli,

270 cc, doğal emişli, dört zamanlı SI motorda, biyogaz yakıtının farklı CO₂ oranlarında (%10, %20, %30 ve %40) motor performansı ve emisyonları sadece benzin kullanımının karşılaştırılması yapılmıştır.

Ortaya çıkan ana sonuçlara göre, biyogaz kullanımı ile CO emisyonları azalır. Biyogazın ana bileşeni olan metanın düşük C/H oranı CO'daki düşüşün ana nedenidir. Biyogazdaki CO içeriği arttıkça THC emisyonları da artmaktadır. Motorun metan yakıtına uygun olmayan tasarımı, yanma odasındaki yarık bölgeleri ve zaten yanmamış HC olan metan yapısı THC emisyonunun artmasının diğer nedenleridir.

Biyogaz kullanımı ile yerel pik silindir içi basınç değerlerindeki artış nedeniyle NO_x emisyonları da artmaktadır. Ancak biyogazda CO₂ oranı %30 ve üzeri değerlere ulaştığında CO₂'nin ısıtma kapasitesi ve azalan O₂ mevcudiyeti nedeniyle NO_x emisyon değerleri sadece benzin kullanımı ile alınan değerlerin altındadır. Motor performansı üzerinde bazı olumsuz etkileri olmasına rağmen, SI motorlarında biyogaz kullanımı EGR etkisini simüle edebilir, böylece NO_x emisyonlarını kontrol etmek mümkün olabilir.

2.4. Çift Yakıtlı Motorlar

Günümüz dünyasında dizel motorların yakın vadede karşılaşacağı en büyük sorunun emisyon problemi olduğu düşünüldüğünde, biyogazın bu motorlarda nasıl bir etkiye neden olacağı da ayrı bir merak konusu olagelmıştır. Her ne kadar biyogazın çift yakıtlı motorlarda performansı artırdığına yönelik literatürde yer almış çalışmalar var olsa da emisyon problemi bu çalışmalar önündeki en büyük soru işareti olarak durmaktadır.

Özellikle 1950'li yıllardan itibaren ayrı birimlerden büyük ölçekteki üretim tesislerine kadar biyogaz teknolojisi geniş bir kullanım alanını kendisine bulmuş, en büyük gelişim ise biyogazın üretimi ve anaerobik atık arıtımı konularında gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu yöntemlerle ortaya çıkan biyogaz üretimi bilimsel olarak daha fazla değerlendirmeye konu olagelmıştır. Klasik anlamda genel ve en çok yürütülen tartışma ise ekonomik anlamda biyogazın sunduğu katkılar ve enerjinin termodinamik olarak daha yüksek değerlikli mekanik enerjiye dönüşümü etrafında şekillenmiştir.

Henham ve Makkar'ın (1998) bu alanda yaptığı çalışmaların sonuçlarına göre, CO esas olarak doğalgaz ikamesi ve daha düşük gaz kalitesi ile elde edilir, çift yakıtlı çalışma ile yanma sırasında daha hızlı bir basınç artışı olduğu gözlemlenir.

Çeper ve arkadaşlarının yıllar sonraki (2017) çalışmasında ise farklı motor devirlerinde ve farklı hava fazlalık oranlarında %65 CH₄ ve %35 CO₂ (tipik bir biyogaz bileşimi) karışımlarıyla çalışan buji ateşlemeli bir motorun performansları ve egzoz emisyonları üzerine deneysel bir çalışma yapılmış ve çalışma bir Ford motoru üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu, 10:1 sıkıştırma oranına ve su soğutmalı dört zamanlı dört silindirli buji ile ateşlemeli bir motordur. Biyogaz ile çalışan motor ile konvansiyonel yakıt ile çalışan motor performansları ve emisyonları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma neticesinde ortaya çıkan sonuçlara göre, biyogaz işlemleri için emisyon parametrelerinin motor devri ile önemli ölçüde değişmediği, biyogaz operasyonlarında fren ısı veriminin metan operasyonuna göre daha düşük olduğu, organik atıkların üretildiği lokasyonlarda kullanılabilen bir enerji şekli olarak biyogazın öne çıktığı saptanmıştır.

Bir başka araştırmada, Montoya ve ark. (2018A) kıvılcım ateşlemeli (SI) biyogaz motorunun performansını iyileştirmek için uygulanan stratejileri sunmaktadır. Buna göre, yüksek sıkıştırma oranına (CR) sahip bir dizel motor, gaz formundaki yakıtlarla beslenmek üzere SI'ya dönüştürüldü ve karışımların vuruntu direncini artırmak adına yakıt olarak biyogaz kullanılmıştır. Ek olarak, biyogazın yanma kapasitesini iyileştirmek adına doğal gaz, propan ve hidrojenle harmanlandığı bu araştırmada, kıvılcım zamanlaması, vuruntu eşiğine en yakın optimum üretim verimlilikleri baz alınarak ayarlanmıştır. Bu çalışma esnasında motorda biyogaz kullanımının orijinal dizel motora (8 kW ve 1800 rpm) kıyasla %6,25'lik bir güç kaybı gözlemlenmiştir. %50 biyogaz ve %50 doğalgaz kullanımında ise en yüksek çıkış gücü (8,66 kW ve 1800 rpm) ve en yüksek üretim verimliliği yüzde 29,8 ile yakalanırken sonuç itibarıyla yapılan bu karışımın propan ve hidrojenle zenginleştirilenlere kıyasla daha iyi sonuçlar sunabileceği sonucuna varılmıştır.

Yine Montoya ve ark. (2018B) bir diğer çalışmasında biyogaz, doğal gaz, propan ve hidrojen yakıt karışımlarıyla çalışan buji ateşlemeli motorlarda eşdeğerlik oranının vuruntu eğilimine etkisi üzerinde deneyler yürütülmüştür. Bu çalışma esnasında gaz yakıtlı iki kıvılcım ateşlemeli (SI) motorda eşdeğerlik oranının vuruntu eğilimine etkisini değerlendirilmektedir.

Ortaya çıkan sonuçlara göre, MN (Metan Number), biyogaz SI motorunun vuruntu davranışını daha iyi açıklayan yakıt özelliği olarak öne çıkmaktadır. Yapılan araştırma sonucunda, hidrojen ilavelerinin, motorun vuruntu eğilimini azaltacak olan yakıt karışımlarının laminar alev hızı (S_L), ve ST (alev sıcaklığı)'sini arttırdığı; ancak hidrojen ilavesinin son gazın tutuşma gecikme süresini azalttığı için vuruntu eğiliminin arttığı saptanmıştır.

Karışımları zayıflatmak için daha yüksek düzeyde kullanılan g neticesinde, motor tarafından daha yüksek hava kütlesi indüklenmesiyle yoğunlukta artış gözlemlenmiştir. Bu fenomenin diğer taraftan sıkıştırma strokunun sıcaklık ve basıncını artırmış dolayısıyla tutuşma gecikme süresini, türbülanslı alev hızını ve alev sıcaklığını azalttığı görülmüştür. Yapılan testler sonucunda tüm bu bileşik etkiler, bütün yakıt karışımlarında motorun vuruntu eğilimini arttırmış ve çıkış gücündeki düşmeyi motorun çalışmasındaki vuruntu eşiğine yakın tutarak zorlamıştır.

Araştırma sonucunda görüldüğü üzere yüksek CR'ye sahip SI modundaki dizel motorlar, yüksek hava indükleme kapasiteleri ve bu yakıtların yüksek vuruntu direnci nedeniyle biyogaz ve NG (natürel gaz) ile yakıt almaya uygundur. Yüksek CR değerine sahip gazlı SI motorlar, motor performansı % gaz keleşi yerine vuruntu eşiğı ile sınırlandığından, ticari düşük CR oranlı SI motorlarından farklı bir şekilde analiz edilmelidir.

Çift yakıtlı dizel motorlarda biyogaz kullanımı üzerine çalışma yürüten Henham ve Makkar (1998), farklı kaynaklardan biyogazda karşılaşılabilecek bir dizi metan karbon dioksit oranını temsil eden, değışen kalitede simüle edilmiş biyogaz kullanarak motor performanslarını incelemişlerdir.

Araştırma programları ayrıca biyogaz kalitesinin etkilerini ve bir dizi hız ve yük üzerinde pilot yakıt enjeksiyonundan elde edilen enerji oranının etkilerini de içerir. Bu çalışmada ilk deneysel test yatağı olarak sabit tipte iki silindirli, endirekt enjeksiyonlu dizel motor kullanılmış ve doğal gaz ve karbondioksit karıştırılarak yakıt kalitesinin değışimi sağlanmıştır. Silindir içi basınç ve krank açısı için bir veri toplama sistemi başarıyla kullanılmış ve özellikle CO ve O₂ için bazı emisyonlar, ölçümler yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan çift yakıtlı bir IDI motorunda değışen yakıt kalitesinde yapılan kapsamlı testler neticesinde %60 gaz yağı ikamesinin, gaz karışımı ile darbesiz olarak mümkün

olduğu saptanmıştır. Çalışmaya göre genel yoğunluk, gaz karışımının değiştirilmesi ve CO₂'nin eklenmesiyle düşer. Egzoz sıcaklığı, NG ikamesi ile CO₂ ilavesinden daha fazla etkilenir. CO, esas olarak NG ikamesi ve daha az gaz kalitesi ile etkindir. Çift yakıtlı çalışma ile yanmada daha hızlı bir basınç artışı olur.

BÖLÜM III

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deney Ekipmanları

Deneyler sırasında kullanılan doğal gaz tipi test motoru, tek silindirli, 1.16 L, sıvı soğutmalı, şarjsız, gaz enjektörü ve dört zamanlı bir motordur. Test motoru özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Test Motoru Özellikleri (Tunçer, 2021)

Motor Markası	Erin Motor
Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi (L)	1.16
Strok Sayısı	4
Piston Çap (mm)	108
Strok (mm)	127
Sıkıştırma Oranı	14.6:1
Maksimum güç (kW)	10 kW @ 1500 rpm
Maksimum. Tork	60 Nm @ 1500 rpm
Soğutma Sistemi	Su
Emme Sistemi	Doğal Aspirasyon



Şekil 3. 1. Deney Motoru

Emisyon ölçümünde; CO, THC ve NO_x ölçümü için Bosch BAE 550 emisyon ölçer kullanılmıştır.

Motor kontrol ünitesi olarak Erin Motor'a ait, Promech firması tarafından geliştirilen ve dışarıdan enjeksiyon sürelerine, ateşleme avansına, kelebek açısına vs. göre müdahale edilebilen bir kontrol ünitesi kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalar sırasında Eddy-current (APICOM firması FR50 modeli) tipi profesyonel motor dinamometresi kullanılmıştır. Şekil 3.2'de dinamometre kontrol ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 3. 2. Dinamometre Kontrol Ünitesi

Şekil 3.3’de yapılan testlerde dinamometre kontrol ünitesinin ekran fotoğrafı bulunmaktadır.



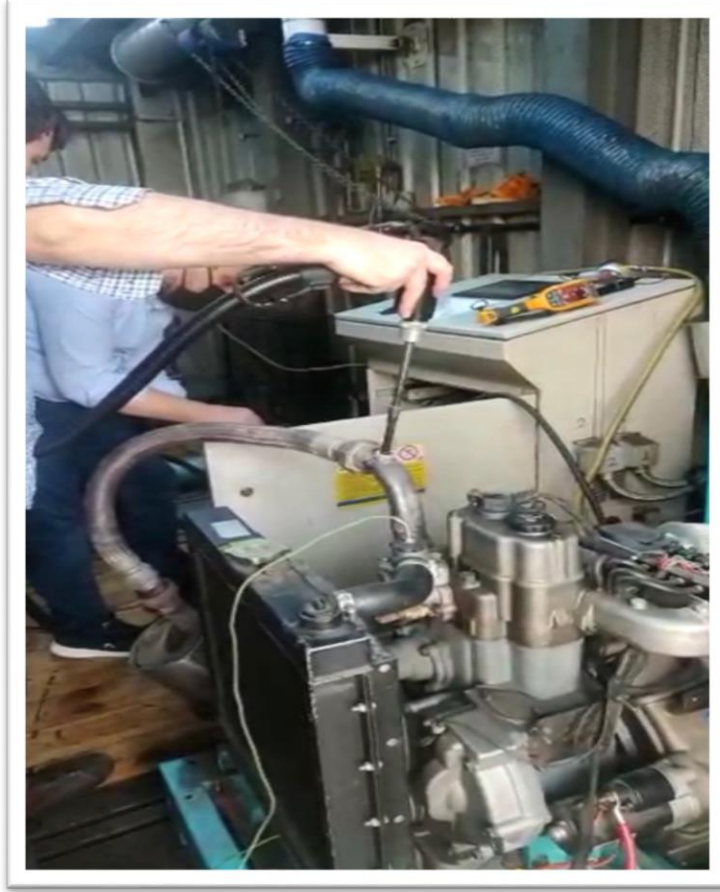
Şekil 3. 3. Dinanometre Kontrol Ünitesinden Görünüm

Dyno, PID kontrol sistemine sahiptir. Hem hız döngüsü tabanlı hem de yük tabanlı motor yükleyebilir.

Ölçümler, doğalgaza göre kalibre edilen yeni TLF serisi akışlı kütle gaz debimetresi ile uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar National Instruments veri toplama sistemi ve Labview yazılımı ile toplanmıştır. Test setinin yerleşim resmi Şekil 3.4.'de verilmiştir.



Şekil 3. 4. Deneysel Kurulum Resmi



Şekil 3. 5. Deney Ölçümleri

Deney ölçümleri esnasındaki görünüm Şekil 3.5. , Şekil 3.6., Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Şekil 3.8.’de ise kontrol amaçlı sıcaklık ölçümü yapılmaktadır.



Şekil 3. 6. Deney Tüpü



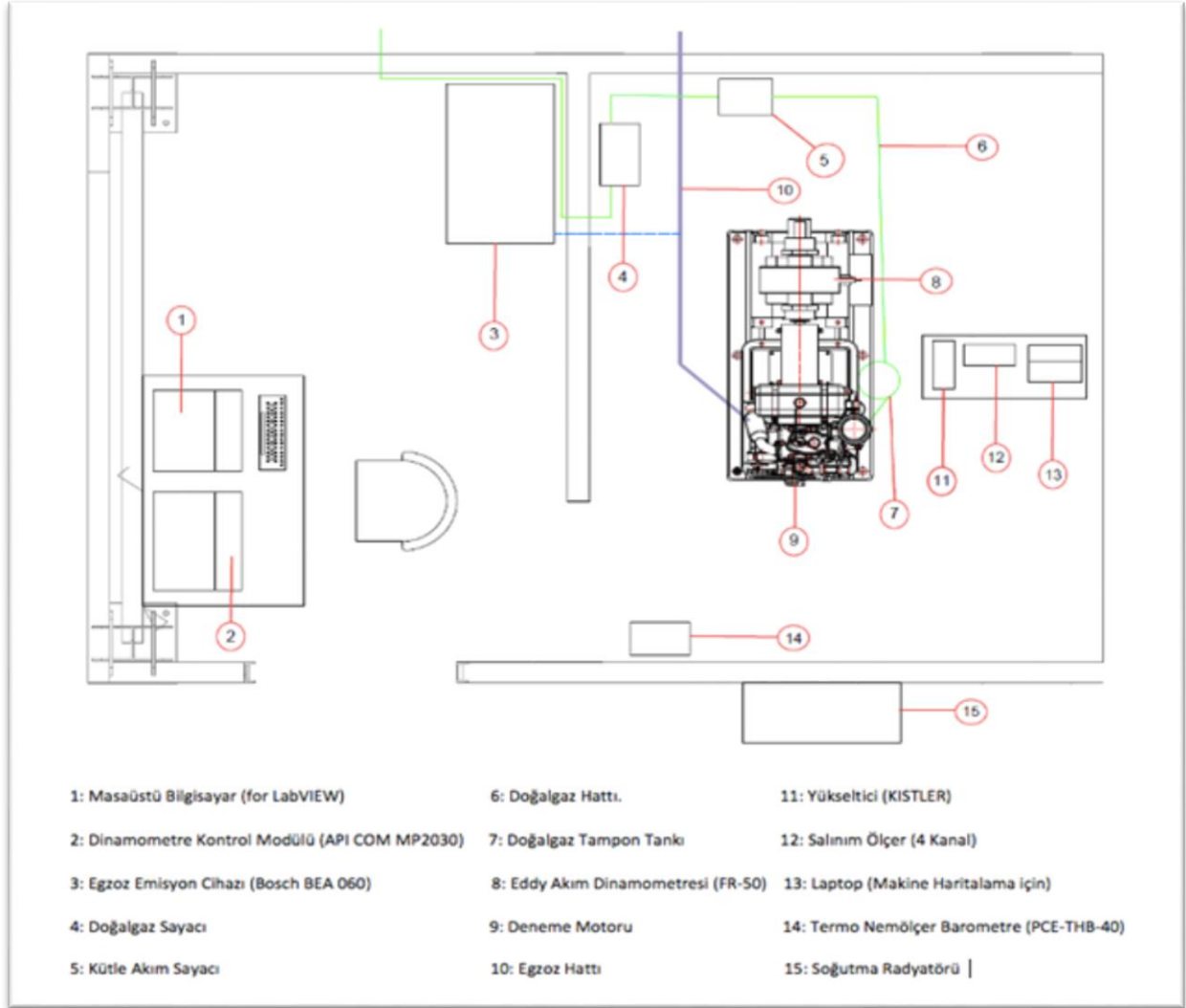
Şekil 3. 7. Deneysel Ölçüm



Şekil 3. 8. Sıcaklık Ölçümü

3.2. Deney Düzeneği

Yapılan çalışmada, bir silindir, mekanik yakıt sistemi ve bir sıkıştırma ateşleme motoru, tasarım yoluyla elektronik kontrollü pozitif ateşleme motoruna dönüştürülmüştür. Ar-Ge çalışmaları ve doğal gaz motoru testlerinde kullanılmıştır. Test odası planı Şekil 3.9.'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3. 9. Test Odasının Figürlü Gösterimi (Tunçer, 2021).

Bu çalışma esnasında kullanılan test setinde Eddy-current (APICAM FR-50) tipindeki profesyonel motor dinamometresi kullanılmıştır. Bu dinamometre hem PID kontrol sistemine sahiptir hem de çevrim bazlı ve yük bazlı güç yükleyebilir, ayrıca bu ikisini aynı anda da yapabilmektedir.

Emisyonları ölçebilmek için Bosch firmasına ait BEA 060 5 gaz analizörü kullanılmıştır. Cihaz CO, CO₂, HC, O₂ ve NO_x emisyonlarını ölçebilmektedir. O₂ ve NO_x emisyonlarını elektrokimyasal metotla, CO, CO₂ ve HC emisyonlarını kızılötesi metotla ölçmektedir.

Cihaz CO emisyonunu hacmen 0.001%, CO₂ emisyonunu hacmen 0.01%, HC emisyonunu 1 ppm, NO_x emisyonunu 1 ppm, O₂ emisyonunu hacmen 0.01% ve lamdayı 0.001 hassasiyet ile ölçebilmektedir.

Silindir içi gaz basınçlarının ölçümü Kistler marka 6502C kodlu M5X0,5 basınç sensörü ve Kistler marka şarj amplifikatörü ile yapılmıştır. Buradan alınan veriler Teledyne T3DS01104 kodlu 4 kanallı osiloskop ile kayıt altına alınmıştır.

Test odası tasarlanırken TS-ISO 3046-1'e göre yapılandırılmıştır, test ve kontrol bölümlerinden oluşturulmuştur. Çevresel nem, basınç ve sıcaklık verilerini ölçmek için kullanılmıştır. Ulusal enstrümantal veri toplama sistemi ve LabWiew programı ile güç, tork, devir, soğutma suyu sıcaklığı, egzoz sıcaklığı, yağ basıncı olan motor verileri kaydedilmiştir ve değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasında kullanılan düzenek, daha öncesinde Tunçer'in (2021) "Pozitif Ateşlemeli Doğalgaz Yakıtlı Bir Motorda Çevrim Atlatma Yöntemlerinin Araştırılması" isimli doktora tez çalışmasında kullanılan aynı deney düzeneğidir.

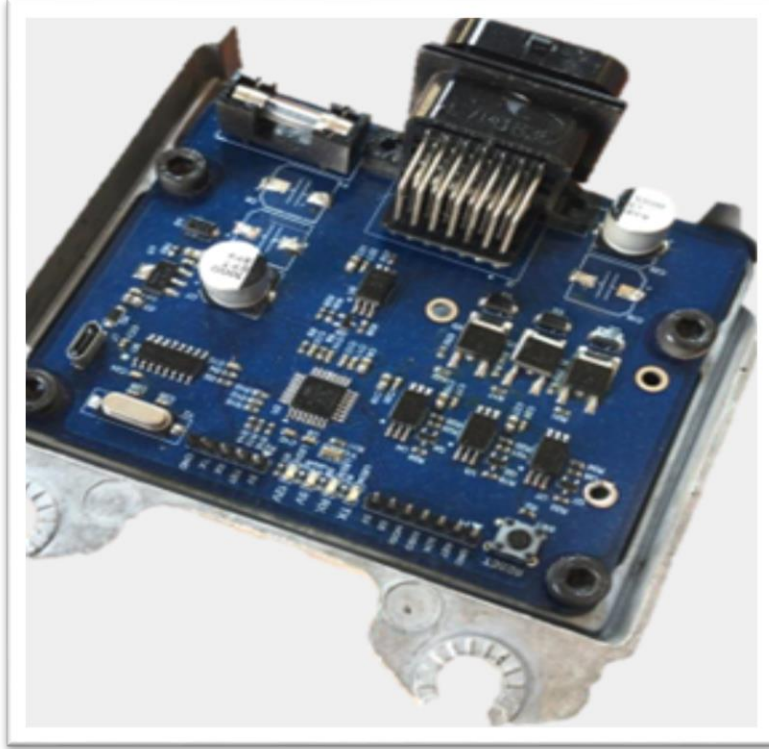
Bu tez için özel olarak tasarlanan düzenekte denenmek üzere, doğalgaz ile çalışacak hale getirilen ürünler tasarlanmıştır.

Tunçer'in (2021) tarihli çalışmasında, bu düzenek mekanik yakıt sistemli dizel motor, elektronik ateşleme ve yakıt sistemine sahip pozitif ateşlemeli bir motor haline dönüştürülerek kullanılmışken, bu çalışmada, farklı oranlarda karbondioksit ve metan içeren biyogazla test edilmiştir.

Dolayısıyla, bahse konu çalışmanın temel kıyaslaması dizel yakıt ve doğalgaz karşılaştırmasına dayanırken, bu tez çalışmasında ise, aynı deney düzeneğinde, alternatif yakıt olarak kullanılan biyogaz ile elde edilebilecek sonuçlar çalışılmıştır.

3.3. Deneysel Çalışmalar

Döngü atlamasıyla motor devri ve torku azaltılmıştır, bu nedenle yakıt miktarı değiştirilmiştir. Devir ve tork sabit kalmıştır, daha sonra ateşleme ilerlemesi ve gaz kelebeği konumu değiştirilmemiştir. Motorun her yeni metot ile rejim koşullarına ulaşması beklenmiştir ve tüm veriler rejim çalışma koşullarına göre alınmıştır. Basınç, üst ölü merkez, enjektör ve ateşleme sinyalleri osiloskop tarafından işlendikten sonra sonuçlandırılmıştır.



Şekil 3. 10. Elektronik Kontrol Sistemi

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Daha önce, motorda farklı yakıt türleri kullanılarak yapılan farklı deneylerde bu tez çalışmasından farklı ve benzer bazı sonuçlar elde edilmiştir.

Örneğin, Tunçer, Sandalcı ve Karagöz'ün (2021) çalışmasında jeneratör motoru için kullanılan sıkıştırma ateşlemeli motor pozitif ateşlemeli motora dönüştürülmüştür. Kimyasal formülü $C_{12}H_{23}$ olan dizel yakıt yerine formülü yüzde 94 oranında CH_4 ve C_2H_6 'dan oluşan doğalgaz kullanılmış, daha düşük karbon salınımı elde edilmiştir.

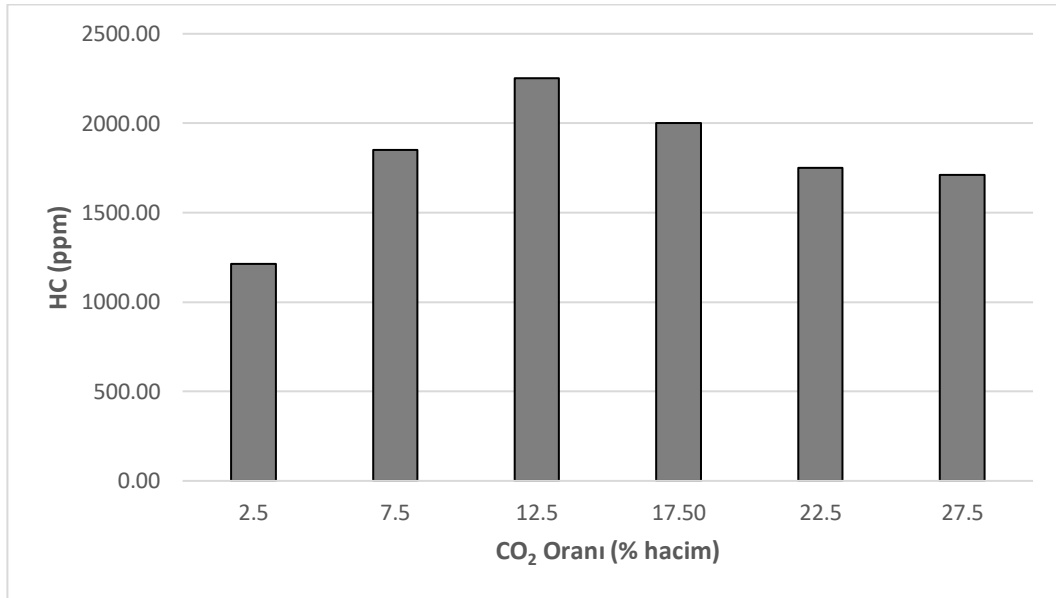
Yapılan bu çalışmadan yola çıkarak, aynı düzenek ve materyallerin kullanımıyla, benzer bir deney biyogazla gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere doğalgaz; Metan (CH_4), Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Karbondioksit (CO_2), Azot (N_2), Helyum (He) ve Hidrojen sülfür (H_2S) gibi çeşitli hidrokarbonlardan oluşan yanıcı bir gaz karışımıdır.

Bu çalışmada ana bileşen karbondioksit ve metan olduğu için bunlarla alakalı bir çalışma yürütülmüş ve farklı oranlarının etkileri araştırılmıştır. Doğalgazın içine karbondioksit katarak biyogaz simüle edilmiştir. Çalışma esnasında farklı CO_2 uygulamalarında, çeşitli sonuçlar elde edilmiş, bazıları ise problemli çıktılar sağlamıştır. Deneylerin sonucunda, sülfirik asit ve farklı elementler de gözlemlenmiştir fakat çalışmanın güvenilir neticeler sunabilmesi açısından sonuçlara dahil edilmemiştir.

Yapılan hesaplamalar motorun 60 gün/yıl, 8 sa/gün, 10 yıl süreyle çalıştığı varsayılarak yapılmıştır. Motora 5 kW yükleme yapılmıştır. Maliyet hesabı yapılırken 35,85 Euro olarak (resmi verilere göre Avrupa ortalaması, bir ton CO_2 'ye göre belirlenmiştir, bu rakam Avrupa'da ton başına alınan vergilendirmeyi temsil eder) hesaplanmıştır.

4.1. HC Emisyonları

Hidrokarbonlar, alev sönme bölgelerinden ve eksik yanmadan açığa çıkan emisyonlardır. Yakıtta CO₂ hacmi 12,5 iken en yüksek HC emisyonu gözlemlenmiş, sonrasında CO₂ oranı yükselse de HC oranında CO₂'nin yüzde 12,5 olduğu seviyede en yüksek HC emisyonu gözlemlenirken, bu oran üzerinde bir artış daha yüksek CO₂ hacminde gözlemlenmemiştir. Yakıttaki CO₂ oranı arttıkça hidrokarbon miktarı artması beklenmektedir. Ancak diğer taraftan, metanın da hidrokarbon türü olduğu göz önünde bulunduğunda, yakıttaki artan metan miktarı ile hidrokarbon miktarı da artmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda, en yüksek hidrokarbon emisyonu, hacimsel olarak yakıtta %12.5 CO₂ oranı ile elde edilmiştir.

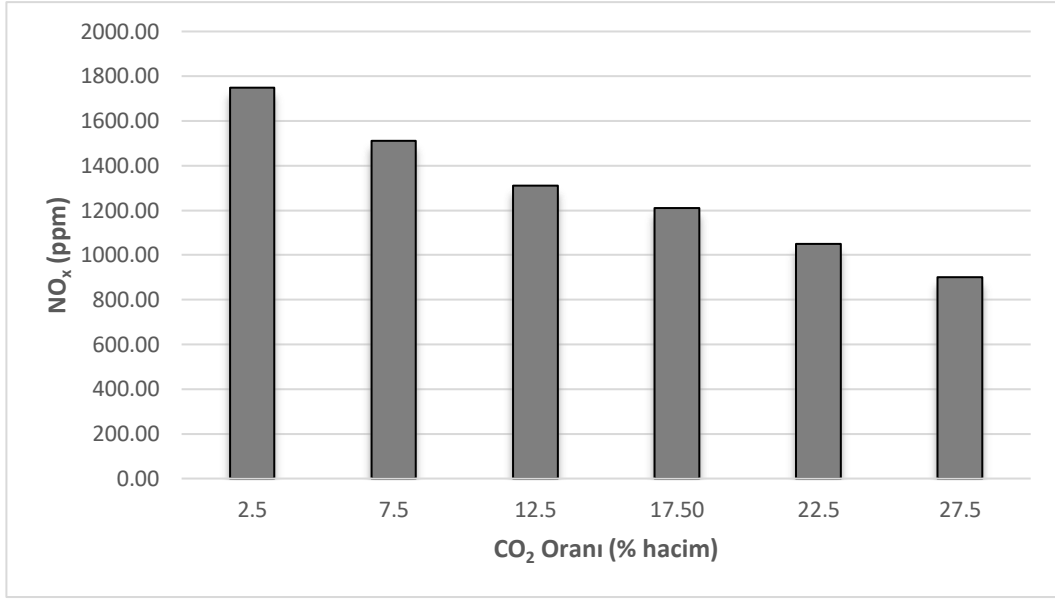


Şekil 4. 1. HC Emisyonları

4.2. NO_x Emisyonları

CO₂ hacmi arttıkça, paralel şekilde NO_x emisyonunun da düşmekte olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, CO₂ arttıkça, yakıttaki oksijen erişilebilirliği düştüğü ve sonuç olarak artan CO₂ oranı ile NO_x emisyonunun düştüğü sonucuna varılmıştır. Bilindiği gibi, içten yanmalı motorlarda, verimli yanma ile silindir içi basınçların artması beklenmektedir. Ancak, yakıttaki CO₂ oranının artması, hem silindir içi pik basınçları ve dolayısıyla pik sıcaklıklarını arttırmakta; hem de oksijen erişilebilirliğini düşürmektedir. Diğer taraftan, yakıttaki artan CO₂ ısı taşıma kapasitesini arttıracığı için, silindir içi sıcaklıkların düşmesini ve dolayısıyla NO_x

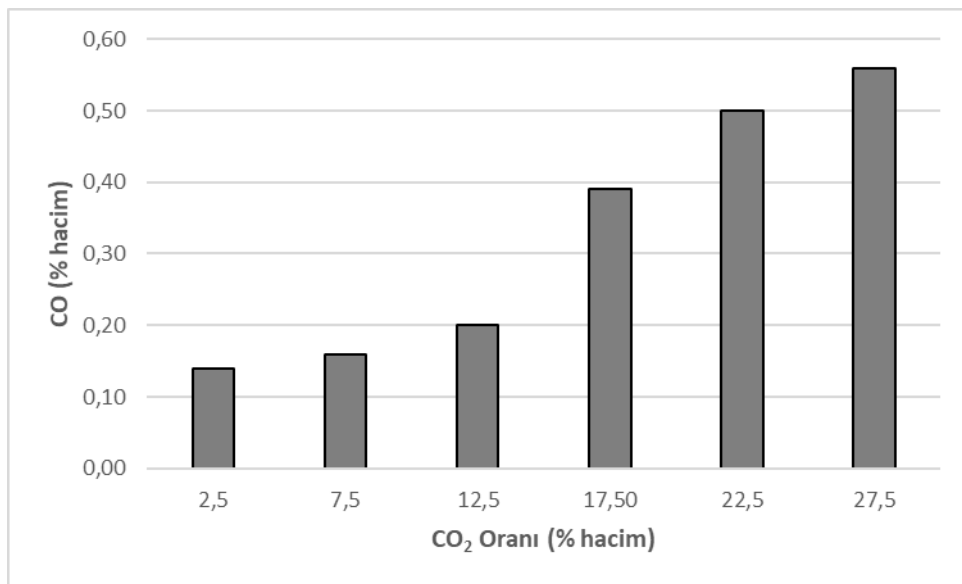
emisyollarının dūřmesini saęlamaktadır. Bu sebepten dolayı, beklendięi gibi, yakıttaki CO₂ oranının artmasıyla, yanma veriminin dūřtūęu sonucuna varılmıřtır.



şekil 4. 2. NO_x Emisyonları

4.3. CO Emisyonları

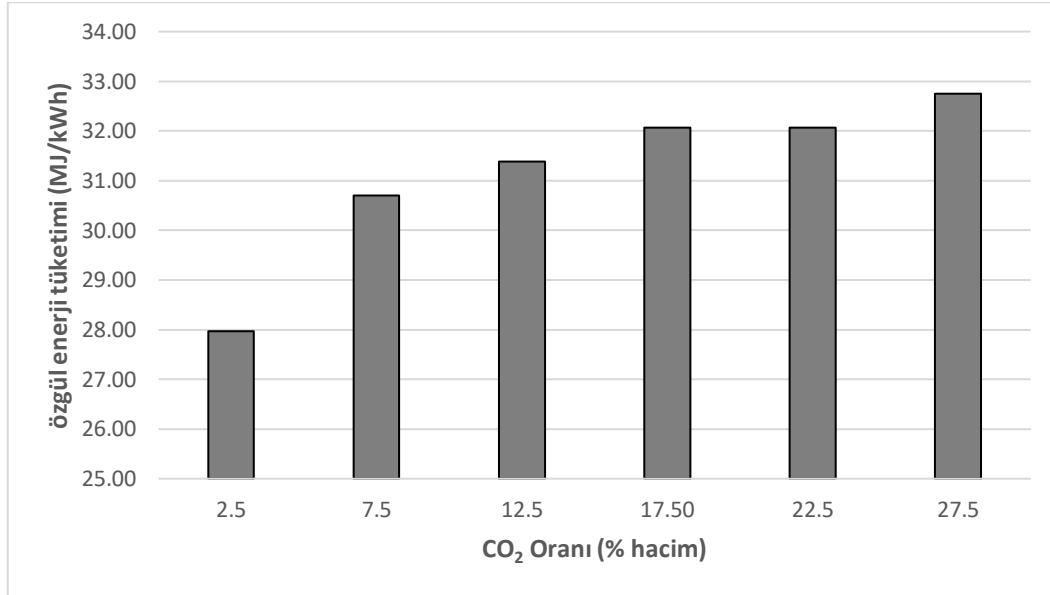
Yakıtta CO₂ oranının artması ile CO emisyonlarında ciddi artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Zira, artan CO₂ oranı ile yanma veriminin ve yakıtın oksijen erişilebilirliğinin dūřmesi ile eksik yanma geręekleřmesi sonucu CO emisyonlarının artması beklenen sonuğ olarak elde edilmiştir.



şekil 4. 3.CO Emisyonları

4.4. Özgöl Enerji Tüketimi

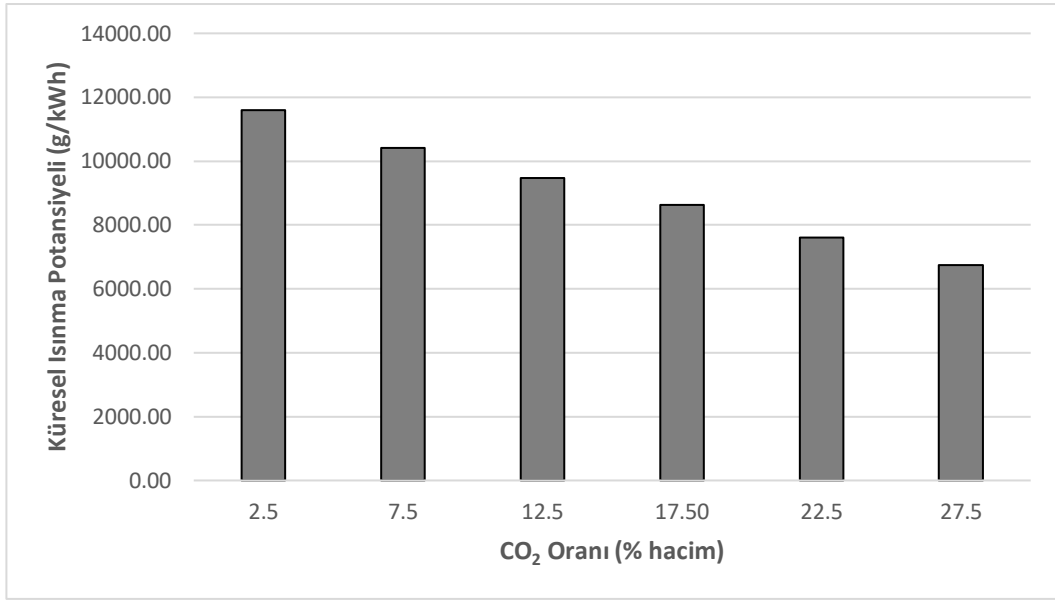
CO₂ hacmi yüzde 17,5 ve 22,5 olduğunda özgöl enerji tüketimi emisyon değerleri arasındaki fark çok değişken değildir, haricen sürekli bir artış vardır. Emisyondaki en bariz artış ise yüzde 2,5 CO₂ hacminden yüzde 7,5 CO₂ hacmine geçilirken gözlemlenmiştir. Zira, alt ısıl değeri değişen ve farklı kalorifik değerdeki yakıtlarda, özgöl enerji tüketiminin değerlendirilmesinin daha uygun olabileceği değerlendirilmiştir. Beklendiği gibi, artan CO₂ miktarı ile yanma veriminin düşmesi ile termik verimin düşmesi sonucu özgöl enerji sarfiyatının arttığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4. 4.Özgöl Enerji Tüketimi

4.5. Küresel Isınma Potansiyeli

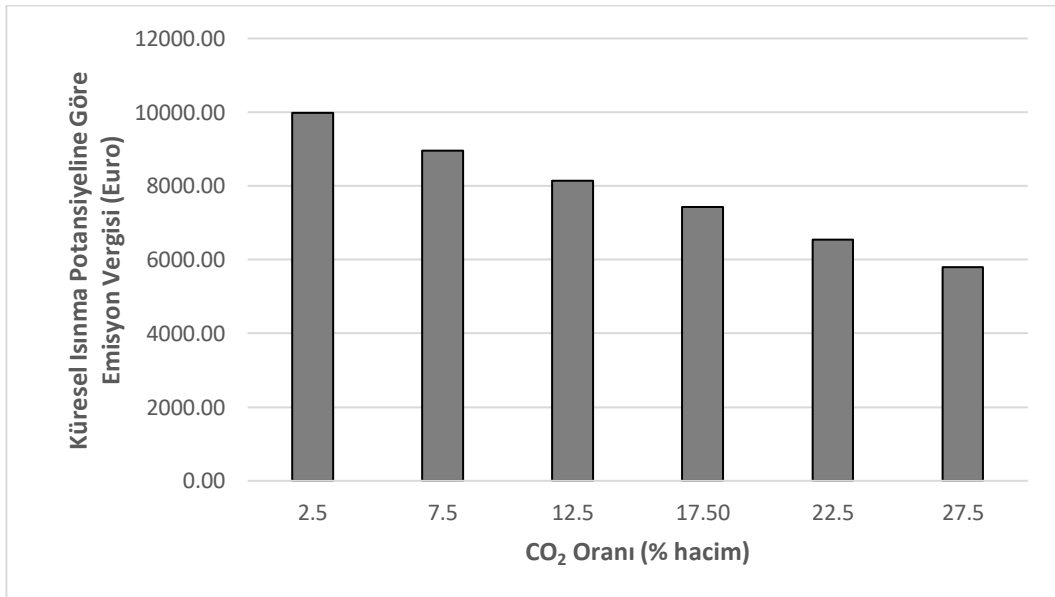
Yukarıda verilen emisyon verileri göz önünde bulundurularak, CO, CO₂, HC, NO_x verileri için GWP (Küresel Isınma Potansiyeli) değerlendirilmiştir. Hesaplamalardan önce, emisyon verileri g/kWh olarak özgöl emisyonlara dönüştürülmüştür. Ardından, gerçekleştirilen hesaplarda, CO için Küresel Isınma Potansiyeli katsayısı 3, HC için 83, NO_x için ise 298 alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda, yakıtta artan CO₂ miktarı ile Küresel Isınma Potansiyeli'nin düştüğü sonucuna varılmıştır.



Şekil 4. 5. Küresel Isınma Potansiyeli

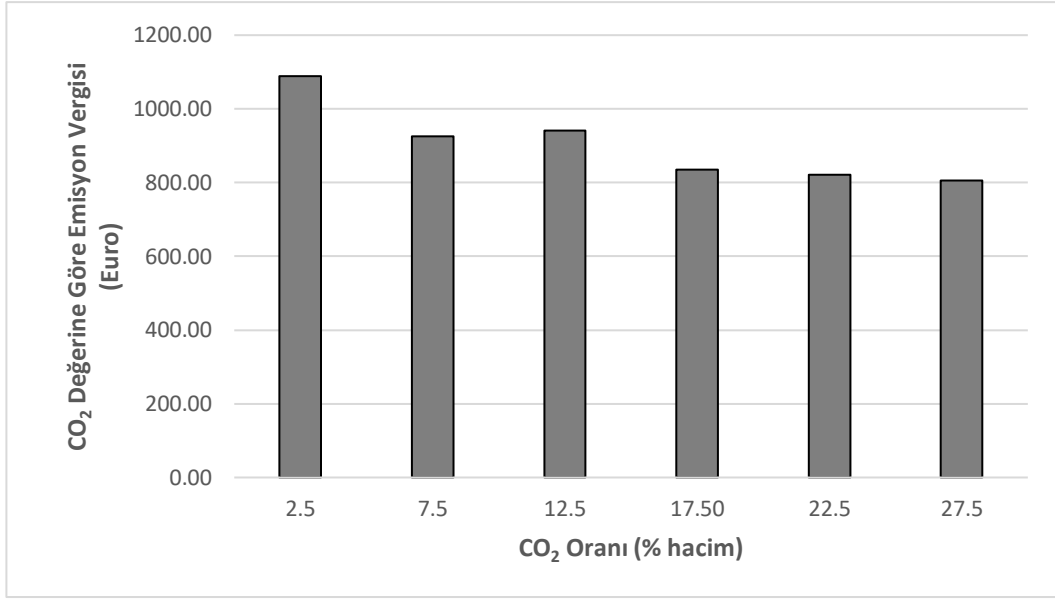
4.6. Emisyon Vergisi

Aşağıda ülkemizde çalışmaların devam ettiği ancak henüz uygulanmaya başlanmayan emisyon vergileri göz önünde bulundurularak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Vergi değerleri, Avrupa'daki ortalama emisyon vergileri göz önünde bulundurularak Küresel Isınma Potansiyeli'ne göre hesaplanmıştır.



Şekil 4. 6. Emisyon Vergisi

Aşağıda ise, CO₂ değerlerine göre emisyon vergileri hesaplanmıştır. Yine, Avrupa ortalama emisyon vergi değerlerine göre hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 7. CO₂ Değerine Göre Emisyon Vergisi

BÖLÜM V

SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Gerçekleştirilen çalışmada, farklı oranlarda biyogaz yakıtı kompozisyonuna sahip motor yanmasının, emisyonlar, özgül enerji tüketimi, Küresel Isınma Potansiyeli ve emisyon vergileri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yakıtta artan CO₂ miktarı ile yanma veriminin düşmesi ile HC ve CO emisyonlarında artış meydana geldiği,
 - Yakıtta artan CO₂ miktarı ile oksijen erişilebilirliğin düşmesi ve CO₂ gazının enerji soğurma kapasitesinin artması ile NO_x emisyonlarının azaldığı,
 - Yakıtta artan CO₂ miktarı ile termik verimin düşmesi ile özgül enerji tüketiminin arttığı,
 - Yakıtta artan CO₂ miktarı ile Küresel Isınma Potansiyeli'nin düştüğü,
 - Yakıtta artan CO₂ miktarı ile emisyon vergilerinin düştüğü,
- sonuçlarına varılmıştır.

5.2. Öneriler

Tez sonucunda, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde, biyogaz yakıtında artan CO₂ oranı ile motordaki enerji sarfiyatının artmasına rağmen, NO_x ve CO gibi zehirli kirleticilerin düştüğü ve dolayısıyla Küresel Isınma Potansiyeli açısından daha olumlu sonuçlar elde edildiği, dolayısıyla Küresel Isınma Potansiyeli açısından yüksek CO₂ oranındaki yakıtın motorda yanmasının daha avantajlı olduğu ve ileride ülkemizde de emisyon vergilerinin de gelmesi ile daha avantajlı hale geleceği sonucuna kanaat olarak varılmıştır.

KAYNAKÇA

Al Seadi, T. 2001. Good practice in quality management of AD residues from biogas production. IEA Brochure, Task 24 "Energy from biological conversion of organic waste". International Energy Agency, Holm-Nielsen, J.B (Coordinator), Univ. Southern Denmark, Biomass Institute, DK 6700 Esbjerg, Niels Bohr vej 9, Denmark

Albritton, D. L., Derwent, R. G., Isaksen, I. S. A., Lal, M., and Wuebbles, D. J.: 1995, 'Trace Gas Radiative Forcing Indices', in Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Bruce, J., Lee, H., Callander, B. A., Haites, E., Harris, N., and Maskell, K. (eds.), *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 205–231.

Anon., 2000a. Anaerobic Digestion of Farm and Food Processing Residues, British Biogen, www.mrec.org/biogas/adgpg.pdf

Aslanlı, Ş. (2009). Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi Üzerine Çeşitli Bor Bileşiklerinin Etkinliğinin Araştırılması. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85 s., Şanlıurfa.

Bade Shrestha, S., & Narayanan, G. (2008). Landfill gas with hydrogen addition – A fuel for SI engines. *Fuel*, 87(17-18), 3616-3626. doi: 10.1016/j.fuel.2008.06.019

Bagher, A. M. (2015). Advantages and disadvantages of biogas energy. *Bulletin of Advanced Scientific Research*, 1(5), 132-5.

Barik, D., Sah, S., & Murugan, S. (2013). Biogas Production and Storage for Fueling Internal Combustion Engines.

Çeper, B., Akansu, S. O., Kahraman, N., & Gökarp, İ. (2017). Investigations On The Performances And Emissions Of A Spark Ignition Engine Fuelled By Biogas. *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, (2), 16-24.

De Faria, M., Vargas Machuca Bueno, J., Ayad, S., & Belchior, C. (2017). Thermodynamic simulation model for predicting the performance of spark ignition engines using biogas as fuel. *Energy Conversion And Management*, 149, 1096-1108. doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.045

Deviren, H., İlkılıç, C., Aydın, S. (2017). Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller ve Biyogazın Kullanım Alanları. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 79-89.

Easterly, J L, & Lowenstein, M Z. *Cogeneration from biofuels: A technical guidebook*. United States.

Ersoy, A.E, 2017, Türkiye'nin Hayvansal Gübre Kaynaklı Sera Gazı Emisyonları Durumu ve Biyogaz Enerjisi Potansiyeli, Hacettepe üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

Gao, M., Wang, D., Wang, Y., Wang, X., & Feng, Y. (2019). Opportunities and Challenges for Biogas Development: a Review in 2013–2018. *Current Pollution Reports*, 5(2), 25-35. doi: 10.1007/s40726-019-00106-7

- Henham, A., & Makkar, M. (1998). Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine. *Energy Conversion And Management*, 39(16-18), 2001-2009. doi: 10.1016/s0196-8904(98)00071-5
- Huang, J., & Crookes, R. (1998). Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine. *Fuel*, 77(15), 1793-1801. doi: 10.1016/s0016-2361(98)00114-8
- Ivens, U.I., Ebbenhøj, N., Poulsen, O.M., Skov, T., 1997. Gastrointestinal Symptoms Among Waste Recycling Workers, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 4, pp. 153–157.
- Karagöz, Y. (2019). Emissions and Performance Characteristics of an SI Engine with Biogas Fuel at Different Co₂ Ratios. *Journal Of Thermal Engineering*, 131-140. doi: 10.18186/thermal.630960
- Karim, G., WIERZBA, I., & Al Alousi, Y. (1996). Methane-hydrogen mixtures as fuels. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 21(7), 625-631. doi: 10.1016/0360-3199(95)00134-4
- Kılıç, F. C. (2007). Biyogaz, Önemi, Genel Durumu ve Türkiye'deki Yeri. *Mühendis ve Makine*, 52(617): 94-106.
- Lashof, D. A. and Ahuja, D. R.: 1990, 'Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming', *Nature* 344, 529–531.
- Leggett, J.A., Graves, R.E., Lanyon, L.E., 2002. Anaerobic Digestion: Biogas Production and Odor Reduction from Manure. <http://www.age.psu.edu/extension/factsheets/g/G77.pdf>
- McCarty, P.L. (1964) Anaerobic Waste Treatment Fundamentals—Part Three—Toxic Materials and Their Control. *Public Works*, 95, 91-94.
- Monnet F. 2003. An Introduction to the Digestion of Organic Wastes. Remade Scotland Report, November, Scotland.
- Montoya, J. P. G., Amell, A. A., Olsen, D. B., & Diaz, G. J. A. (2018B). Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen. *international journal of hydrogen energy*, 43(46), 21592-21602.
- Montoya, J. P. G., Diaz, G. J. A., & Arrieta, A. A. A. (2018A). Effect of equivalence ratio on knocking tendency in spark ignition engines fueled with fuel blends of biogas, natural gas, propane and hydrogen. *International journal of hydrogen energy*, 43(51), 23041-23049.
- Nelson, C. ve Lamb, J. 2002. Haubenschild farms anaerobic digester final report. The Minnesota Project. August - <http://www.epa.gov/agstar/lib/index.html>
- Nigam, P., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress In Energy And Combustion Science*, 37(1), 52-68. doi: 10.1016/j.pecs.2010.01.003

Öztürk, M., 'Hayvan Gübresinden Biyogaz Üretimi', T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşarlığı, Ankara, 2005

Porpatham, E., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2008). Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as a fuel for a spark ignition engine. *Fuel*, 87(8-9), 1651-1659. doi: 10.1016/j.fuel.2007.08.014

Porpatham, E., Ramesh, A., & Nagalingam, B. (2012). Effect of compression ratio on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. *Fuel*, 95, 247-256. doi: 10.1016/j.fuel.2011.10.059

Prajapati, H. (2014). Emission analysis of biogas premixed charge diesel dual fuelled engine. *IOSR Journal Of Engineering*, 4(5), 54-60. doi: 10.9790/3021-04535460

Ray, N., Mohanty, M., & Mohanty, R. (2013). Biogas as Alternate Fuel in Diesel Engines: A Literature Review. *IOSR Journal Of Mechanical And Civil Engineering*, 9(1), 23-28. doi: 10.9790/1684-0912328

Reitz, R., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T., Kokjohn, S., & Moriyoshi, Y. et al. (2019). IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal Of Engine Research*, 21(1), 3-10. doi: 10.1177/1468087419877990

Rodhe, H.: 1990, 'A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse Effect', *Science* 248, 1217–1219.

Schimel, D. S. et al.: 1996, 'CO₂ and the Carbon Cycle', in Houghton, J. T. et al. (eds.), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 65–86.

Shine, K., Derwent, R. G., Wuebbles, D. J., and Morcrette, J. J.: 1990, 'Radiative Forcing of Climate', in Houghton, J. T. et al. (eds.), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp. 41–68.

Şenol, H., Elibol, E., Açikel, Ü., & Şenol, M. (2017). Türkiye’de Biyogaz Üretimi İçin Başlıca Biyokütle Kaynakları. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 81-92. doi: 10.17798/bitlisfen.315118

Tolay, M., Yamankaradeniz, H., Yardımcı, S., & Reiter, R. (2008). Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi.

Tunçer E., Sandalci T., Karagöz Y. (2021). Investigation Of Cycle Skipping Methods In An Engine Converted To Positive Ignition Natural Gas Engine. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 13(9), 1-10, DOI 10.1177/16878140211045454

Tunçer, E. (2021). Pozitif Ateşlemeli Doğalgaz Yakıtlı Bir Motorda Çevrim Atlama Yöntemlerinin Araştırılması (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi.

UNEP. (2018). The Path from Kigali: HFC Phase-Down Timeline. Retrieved from <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26592?show=full>

United Nations. The Montreal Protocol evolves to fight climate change | UNIDO. Retrieved from <https://www.unido.org/our-focus-safeguarding-environment-implementation-multilateral-environmental-agreements-montreal-protocol/montreal-protocol-evolves-fight-climate-change>

United States Environmental Protection Agency. (2022). Understanding Global Warming Potentials | US EPA. Retrieved from <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

Vijayalekshmy, M. V. (1985). Biogas technology-an infor-V. 1985. *Biogas technology-an infor-1985. Biogas technology-an information package, Tata Energy Research Institute, Bombay.*

Yılmaz, F. & Tosun, C. (2014). Düşük küresel ısınma potansiyeline sahip hfo-1234ze akışkanın termodinamik analizi . Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi , 30 (5) , 308-313 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/erciyesfen/issue/25555/269574>