



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**KÜÇÜK GÜÇTEKİ BİYOGAZ TESİSLERİNDE
KULLANILMAK ÜZERE KOJENERASYON
UYGULAMASINA UYGUN DÖRT SİLİNDİRLİ BİR
BİYOGAZ MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ**

Doktora Tezi

Abdulhalik Emre TEKSAN

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KÜÇÜK GÜÇTEKİ BİYOGAZ TESİSLERİNDE
KULLANILMAK ÜZERE KOJENERASYON
UYGULAMASINA UYGUN DÖRT SİLİNDİRLİ BİR
BİYOGAZ MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ**

Abdulhalik Emre TEKSAN

Danışman: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

İzmir
2023

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “KÜÇÜK GÜÇTEKİ BİYOGAZ TESİSLERİNDE KULLANILMAK ÜZERE KOJENERASYON UYGULAMASINA UYGUN DÖRT SİLİNDİRLİ BİR BİYOGAZ MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

18 / 10 / 2023

İmzası

Adı-Soyadı

Abdulhalik Emre Teksan

ÖZET**KÜÇÜK GÜÇTEKİ BİYOGAZ TESİSLERİNDE
KULLANILMAK ÜZERE KOJENERASYON UYGULAMASINA
UYGUN DÖRT SİLİNDİRLİ BİR BİYOGAZ MOTORUNUN
GELİŞTİRİLMESİ**

TEKSAN , Abdulhalik Emre

Doktora Tezi, Enerji Teknolojileri Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

17 Ağustos 2023

Bu doktora tezi çalışmasının motivasyonu, lojistik sebeplerle büyük ölçekli biyogaz tesislerinde değerlendirilmesi mümkün olmayan biyokütle kaynaklarının bulunduğu bölgelerde, elektrik enerjisi ve organik gübrenin ekonomik anlamda azami katkıyı sağlayacak hale getirilmesini sağlayacak, birleşik bir sistemin ortaya konulması olmuştur.

Bu çalışma sürecinde dört silindirli bir biyogaz motorunun geliştirilmesi, performans ölçümleri ve saha uygulamasının yapılmasının yanı sıra, bir biyogaz tesisinde, biyogaz ile çalışacak bir motorun sağlıklı bir şekilde çalışmasının tesis edilebilmesi maksadı ile biyogaz analizörü, gaz şartlandırma ve temizleme sistemleri, kojenerasyon ünitesi gibi sistemlerin tasarım ve geliştirme süreçleri tamamlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ilk yatırım maliyetinin düşürülmesi amacıyla dizel yakıtlı bir motorla azami ölçekte ortak parçaların kullanılması sağlanarak düşük yatırım ve üretim maliyetiyle yerli üretim bir motor üretilmiştir. Üretilen motorun TA-Luft 2002 emisyon limitlerine uygunluğu, tam yükte % 35 üzeri termik verim sağlanması gibi tasarım isterleri sağlanmış ve ürün saha testlerine çıkarılmıştır. Saha testlerinde biyogaz içindeki aşındırıcı içeriklerin motor yağına tesiri analiz edilmiş bunun motor parçalarına olan aşındırıcı etkileri ortaya konulmuştur.

Anahtar sözcükler: gaz motoru, biyogaz, dizel, kojenerasyon, hidrojen sülfür, arıtma, biyokütle,



ABSTRACT**DEVELOPMENT OF A FOUR-CYLINDER BIOGAS ENGINE AS
COGENERATION APPLICATION FOR SMALL-SCALE BIOGAS
PLANTS**

TEKSAN , Abdulhalik Emre

Doctoral Thesis, Department of Energy Technologies

Thesis Advisor: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

17 August 2023

The motivation for this doctoral thesis is to present a combined system that will make it possible to maximize the economic contribution of electricity and organic fertilizer in regions where there are biomass resources that cannot be evaluated in large-scale biogas facilities for logistical reasons.

During this study, the development of a four-cylinder biogas engine, performance measurements, and field implementation were carried out. In addition, to ensure the smooth operation of an engine running on biogas in a biogas facility, the design and development processes for systems like a biogas analyzer, gas conditioning and cleaning systems, and a cogeneration unit were completed. As a result of the studies conducted, to reduce the initial investment cost, the maximum number of common parts with a diesel-fueled engine was used, resulting in a domestically produced engine with low investment and production costs. The produced engine met the TA-Luft 2002 emission limits, ensured design requirements like providing over 35% thermal efficiency at full load, and was taken to field tests. In the field tests, the effect of abrasive contents in the biogas on the engine oil was analyzed, revealing its abrasive effects on engine parts.

Keywords: gas engine, biogas, diesel, cogeneration, hydrogen sulfide, purification, biomass.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmama başlangıcından bitiş sürecine kadar her zaman, bilgisi ve tecrübesi ile beni yönlendiren kıymetli tez danışmanı hocam, Sayın Prof. Dr. Günnur KOÇAR'a, akademik çalışmalara başlangıcına vesile olup sonrasında da devam etmemde bana hep yardımcı olan ve motivasyon sağlayan izleme komitesi üyesi kıymetli hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ERYAŞAR'a ve tez izleme sürecinde bana yol gösteren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Bülent YEŞİLATA hocama,

Tez çalışmam sırasında benden yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Dr. Tuğba TETİK, Sayın Dr. Erdal TUNÇER, Sayın Dr. Emre AYTAV hocalarıma,

Bana hep hocalık yapan ve öğrendiklerimi borçlu olduğum Sayın Muzaffer TETİK'e

Beni yetiştiren annem Gülçin TEKSAN, rahmetli babam Abdulkadir TEKSAN ve ağabeyim Yunus TEKSAN'a teşekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel bilgiler	4
1.2 Biyogaz ve biyokimyasal süreç	8
1.3 Biyogaz üretiminde kullanılan materyaller.....	13
1.4 Biyogazın kullanım alanları	14
1.5 Biyogazın teorik yanma denklemi	16
1.6 Biyogazın tarihsel kullanım süreci.....	18
1.7 İçten yanmalı motorlarda biyogaz kullanımı	20
1.8 Kıvılcım ateşlemeli motor teorisi.....	23
2. MATERYAL VE METOD	25
2.1 Materyal	25
2.1.1 Deney motoru	25
2.1.2 Alternatör.....	26
2.1.3 Yük bankası	27
2.1.4 Baca gazı emisyon cihazı	27
2.1.5 Gürültü emisyonu ölçüm cihazı.....	29
2.1.6 Termal kamera	30
2.1.7 İvmeölçer ve veri kayıt sistemi.....	31
2.1.8 Gaz sayacı.....	32
2.1.9 Doğalgaz özellikleri.....	33
2.1.10 Özel karışım biyogaz	33
2.1.11 Kullanılan motor yağı.....	34
2.2 Metot	35
2.2.1 Kavramsal tasarımın oluşturulması	35

2.2.2	Test ve geliştirme planı hazırlanması.....	35
2.2.3	Deney düzeneği.....	36
2.2.4	Motor tasarımı.....	37
2.2.5	Turboşarj seçimi.....	38
2.2.6	Piston seçimi	38
2.2.7	Silindir kapağı tasarımı	40
2.2.8	Yakıt sistemi tasarımı.....	42
2.2.9	Gaz kelebeği.....	43
2.2.10	Yağlama sistemi.....	44
2.2.11	Motor kontrol sisteminin tasarımı.....	44
2.2.12	Şasi harmonik analizleri.....	47
2.2.13	Motor yanma verileri	50
2.2.14	Türbin ve kompresör haritaları	51
2.2.15	Motor soğutma sistemi tasarım	53
2.2.16	Gaz yakıt düzeltme katsayısı (K)	54
2.2.17	Motor modelinin geliştirilmesi.....	55
	<i>DeneySEL Bulgularla Matematiksel Model Geliştirilmesi.....</i>	<i>57</i>
	<i>Yakıt miktarının modellenmesi</i>	<i>58</i>
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	61
3.1	Matematiksel modelin doğrulaması	61
3.1.1	Maksimum belirsizlik değerleri	63
3.1.2	Silindir-içi basınç değerleri	63
3.2	DeneySEL verilerin analizi.....	64
3.3	Saha kurulumu ve biyogaz ile yapılan testler.....	72
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78
	KAYNAKLAR DİZİNİ.....	81
	ÖZGEÇMİŞ.....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Örnek biyogaz üretim tesisi.	9
Şekil 1.2 Anaerobik fermantasyon akış şeması.....	11
Şekil 1.3 Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu.....	12
Şekil 1.4 CH ₄ /CO ₂ oranının Türbülanslı Yanma Hızına Etkisi.....	21
Şekil 1.5 Gerçek ve ideal Otto çevrimleri.....	24
Şekil 2.1 Deney motoru.....	25
Şekil 2.2 Alternatör genel görünümü.....	26
Şekil 2.3 Yük bankası	27
Şekil 2.4 Baca gazı ölçüm cihazı	28
Şekil 2.5 Akustik ölçümleri için kullanılan cihaz	29
Şekil 2.6 Çalışmada kullanılan termal kamera.....	40
Şekil 2.7 İvmeölçer düzeneğinin genel görünümü.....	41
Şekil 2.8 MMF KS80C model titreşim sensörü genleşme eğrisi	42
Şekil 2.9 Körüklü gaz sayaçları için genel görünüm (G25).....	42
Şekil 2.10 Çalışmanın kapsam ve içeriği	36
Şekil 2.11 Deney ortamı.....	37
Şekil 2.12 Deney düzeneğinin şematik görüntüsü.....	37
Şekil 2.13 Üç parçalı yağ segmanı kesiti.....	38
Şekil 2.14 Yanma odası içerisinde girdap ve takla oluşumu.....	39
Şekil 2.15 Volümetrik kinetik enerji grafiği.....	40
Şekil 2.16 Yanma odası içinde hız grafiği.....	40
Şekil 2.17 Silindir gömlek yüzeylerindeki ısıl değerlerin simülasyonu.....	41
Şekil 2.18 Buji kovan kesiti.....	42
Şekil 2.19 Gaz mikseri.....	42
Şekil 2.20 Ateşleme bobini.....	43
Şekil 2.21 Teflon uzatma parçası	43
Şekil 2.22 Gaz kelebeği.....	44
Şekil 2.23 Motor kontrol sistemi.....	45
Şekil 2.24 Kojen-trijen proses otomasyonu.....	46
Şekil 2.25 Intercooler ile radyatör arasındaki kontrol algoritması.....	47
Şekil 2.26 Şasi harmonik analizi.....	47
Şekil 2.27 Şasi harmonik analizi 12,5 Hz	48
Şekil 2.28 Şasi harmonik analizi 25 Hz.....	48
Şekil 2.29 Şasi harmonik analizi 50 Hz.....	49
Şekil 2.30 Şasi harmonik analizi 75 Hz.....	49
Şekil 2.31 Titreşim iletim grafiği.....	50
Şekil 2.32 Krank açısına bağlı yanma oranı grafiği.....	51
Şekil 2.33 Piyasadan temin edilen üç farklı turboşarja ait türbin haritası.....	52
Şekil 2.34 Intercooler LT/HT görünümü.....	54
Şekil 2.35 Tasarlanan motor modeli.....	56
Şekil 2.36 Motor için oluşturulan matematiksel model.....	57
Şekil 2.37 Modellemede kullanılan boyut ve özellikler.....	58
Şekil 2.38 Matematiksel model.....	58
Şekil 2.39 Yazılıma tanımlanan özellikler.....	59

Şekil 2.40 Yanma modelleri.....	60
Şekil 3.1 Farklı motor yükleri için elde edilen motor gücü değerleri.....	61
Şekil 3.2 Farklı motor yüklerinde elde edilen termik verim değerleri	62
Şekil 3.3 Farklı motor yüklerinde elde edilen CO emisyon değerleri.....	62
Şekil 3.4 Farklı motor yüklerinde elde edilen NO _x emisyon değerleri	63
Şekil 3.5 Deneysel sonuçlar ve matematiksel modelin karşılaştırılması.....	64
Şekil 3.6 Lambda değerine bağlı termik verim değişimi	65
Şekil 3.7 Yüke bağlı verim değişimi	66
Şekil 3.8 Yüke bağlı olarak motorda enerjinin dağılımı	67
Şekil 3.9 FFT Analiz Grafiği.....	70
Şekil 3.10 Biyogaz tesisi saha kurulumu.....	72
Şekil 3.11 Biyogaz gaz içeriği analizi.....	73
Şekil 3.12 Biyogaz H ₂ S oranı.....	73
Şekil 3.13 Turboşarj thrust washer parçası görüntüsü.....	75
Şekil 3.14 Thrust washer parçası spektroskopi analizi.....	76
Şekil 3.15 Thrust washer parçası SEM görüntüsü.....	76
Şekil 3.16 Thrust washer parçası SEM görüntüsü.....	77
Şekil 3.17 Yağ soğutucu borusu SEM görüntüsü.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİÇizelgeSayfa

Çizelge 1.1 Çeşitli yakıtların özellikleri.....	10
Çizelge 1.2 Çeşitli materyallerin biyogaz özellikleri.....	14
Çizelge 1.3 Biyogaz ve doğal gaz yakıtlarının karşılaştırılması.....	20
Çizelge 2.1 Deney motoru teknik özellikleri.....	20
Çizelge 2.2 Alternatör verim değerleri.....	26
Çizelge 2.3 Alternatör teknik verileri.....	26
Çizelge 2.4 Ölçüm yapılabilen gazlar ve ölçüm aralıkları.....	28
Çizelge 2.5 Ses seviyesi ölçer özellikleri.....	29
Çizelge 2.6 Kullanılan termal kamera için teknik özellikler.....	30
Çizelge 2.7 Üç eksenli ivmeölçer sensörü teknik özellikleri.....	32
Çizelge 2.8 G25 model körüklü tip sayaç için teknik veriler.....	32
Çizelge 2.9 Doğalgazın kimyasal özellikleri.....	32
Çizelge 2.10 Biyogazın özellikleri.....	34
Çizelge 2.11 2 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.....	34
Çizelge 2.12 Biyogazlı fakir yanma.....	53
Çizelge 3.1 Belirsizlik değerleri.....	63
Çizelge 3.2 Gaz motoru test verileri.....	68
Çizelge 3.3 Gaz motoru emisyon ölçüm değerleri.....	68
Çizelge 3.4 Akustik ölçüm sonuçları.....	69
Çizelge 3.5 Motor yağı özellikleri.....	71
Çizelge 3.6 Motor yağı analiz değerleri (0 saat-1000 saat).....	74



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
K	Sayaç düzeltme katsayısı
λ	Lambda (Hava Fazlalık Katsayısı)
m_d	Düzeltilmiş hacim
m_s	Sayaçtan ölçülen hacim
P	Basınç
P_a	Aylık şehir gaz giriş istasyonu basınç değeri
P_s	Sayaç ölçüm basıncı
P_r	Referans şartlardaki basınç değeri
T_r	Referans şartlardaki sıcaklık değeri
T	Sıcaklık
Z_r/Z	Sıkıştırılabilirlik oranı
Z_r	Referans şartlardaki sıkıştırılabilirlik
H_n	Gaz yakıtların genel alt ısıl değeri
d	Gaz yakıt özgül ağırlığı
b_e	Özgül yakıt tüketimi
n	Motor devri
R	Gaz sabiti
v	Hacim
p	Basınç

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
EGR	Egzoz gaz geri dönüşümü
LPG	Likit petrol gazı
CNG	Sıkıştırılmış doğalgaz
FFT	Hızlı Fourier dönüşümü
TK	Toplam katı madde
UK	Uçucu katı madde
BTDC	Üst ölü noktadan önce
ISO	Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı
SAE	Otomotiv Mühendisleri Derneği
SI	Kıvılcım ateşlemeli
IDI	Endirekt dizel enjeksiyon
CI	Sıkıştırma ateşlemeli
PSA	Basınç salınımlı adsorpsiyon
pH	Hidrojen potansiyeli
kWh	Kilowatt saat
kWm	Kilowatt mekanik
HT	Yüksek sıcaklık
LT	Düşük sıcaklık
Cp	Spesifik ısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)Kısaltmalar Açıklamalar

PLC	Programlanabilir mantıksal denetleyici
PID	Kontrol geri bildirim mekanizması
Cos ϕ	Güç faktörü
dB	Desibel
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
μm	Mikrometre
mA	Miliamper
LHV _G	Gaz yakıtı alt ısı değeri
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TAN	Toplam asit sayısı
TBN	Toplam baz sayısı
ppm	Milyonda bir parçacık
KMA	Krank mili açısı
H/Y Oranı	Hava/Yakıt oranı
CH ₄	Metan gazı
H ₂ S	Hidrojen Sülfür
NH ₃	Amonyak
CO ₂	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
NO _x	Azotoksit

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)Kısaltmalar Açıklamalar

HC Hidrokarbon

SO₂ Kükürtdioksit

SO₄ Sülfat

NaOH Kostik

H₂O Su

H₂ Hidrojen gazı

1. GİRİŞ

Türkiye’de 2022 yılında 17 milyon üzerinde büyükbaş, 58 milyon üzerinde küçükbaş ve 380 milyon üzerinde kanatlı hayvan stoğu bulunduğu kaydedilmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Buna mukabil ülkemizde aynı yıl içerisinde biyogazdan lisanslı ve lisanssız santrallerin toplamında elde üretilen elektrik 352.000 MWh mertebesinde gerçekleşmiştir (EPIAŞ Şeffaflık Platformu, 2022).

Aynı yıl içinde Almanya’da 12 milyon üzerinde büyükbaş, 29 milyon üzerinde küçükbaş ve 172 milyon üzerinde kanatlı hayvan stoğu kaydedilmiştir (Statistisches Bundesamt, 2022). Almanya’da kayıtlı 12.000’in üzerindeki tesislerden 2022 yılında toplam biyogazdan elektrik üretimi 31.000.000 MWh olarak gerçekleşmiştir (Statistisches Bundesamt, 2022). Bu elektriğin Türkiye ortalama piyasa fiyatı eşleniği 2.2 Milyar USD’dir.

Avrupa’nın biyogazdan en çok üretim yapan ülkesi Almanya’dır ve her ne kadar üretilen biyogazın % 85’inin üzeri elektrik üretimi için kullanılıyor olsa dahi biyometan olarak da kullanımı ve gazın temizlenerek şebekeye basılması konusunda çalışmalar giderek hızlanmaktadır (EBA, 2022).

Ülkemizdeki biyokütle potansiyelinin, biyogaz adına değerlendirilemediği dünyadaki diğer örnekler de göz önüne alındığında rahatlıkla görülebilmektedir.

Buna sebep olan etkenler birkaç başlık altında irdelenebilir. Enerji politikaları ve teşvikler ülkemizde nispeten YEKDEM süreciyle beraber son yıllarda ortaya konmuş ve yenilenebilir enerjilere yatırım ve kaynak çeşitliliği özendirilmiştir.

Bunun dışında yatırım ve finansman şartlarına erişimin de gelişim önünde bir engel olduğu değerlendirilebilmektedir, her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik olarak TURSEFF ve benzeri kredilendirme imkanları olsa da yine de bunların erişim maliyetleri diğer gelişmiş ülkelerdeki kaynak maliyetlerinin üzerinde olmuştur.

Dünya’da biyogaz üretiminde potansiyelini diğer ülkelere nazaran daha iyi kullanabilen ülkeler incelendiğinde, diğerlerinden daha ileride olan ülkelerin

biyogaz üretimi ve enerjiye dönüşümü konusunda gerekli proses ve teknolojileri yerel kaynaklarla çözdüğü görülmektedir.

Özellikle gelir seviyesi olarak dezavantajlı konumda bulunan ülkemizin yabancı kaynaklardan ithal edilen teknoloji ve ekipmanlar ile biyokütle konusundaki potansiyelini hızlı bir şekilde değerlendirebilmesi imkânı bulunmamaktadır.

Buna ek olarak ülkemizin coğrafi şartları sebebiyle biyokütlenin merkezi tesislere taşınması ve burada biyogaz eldesi de her zaman ekonomik anlamda makul sonuçlar vermemektedir. Bu sebeple yerel çözümler ile lojistik kayıpların önüne geçebilecek çözümlerin aranması da gerekmektedir.

Bu sayede biyogaz üretimi esnasında ortaya çıkan fazla ısı, CO₂ emisyonları ve organik gübre de yerel olarak değerlendirilebilecek ve işleticilere ekonomik katkı sağlayabilecektir.

Ülkemizde gübre sektörünün en büyük sorunu ülkemizin kimyasal gübre hammaddelerine sahip olmamasıdır, gübre üretiminde % 80'lik oranla temel girdi durumunda olan doğalgaz, fosfat kayası gibi hammaddeler ithal kalemidir (Gübre Sektör Politika Raporu, 2018).

Tarım ve hayvancılıkta kalkınmayı sağlamak adına üreticinin enerji, gübre için harcadığı kaynakları azaltmak, gereklidir, bunun için gerekli teknolojilerin yerleştirilmesi ve makul bir ücretle sunulması gereklidir.

Küresel ölçekte enerji kullanım alanının her geçen gün artması ve fosil yakıtların tükenmesiyle birlikte enerji ihtiyacı konusunda artan talep, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji teknolojileri alanındaki araştırmaları teşvik etmektedir. Endüstriyel sistemlerin enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik anlamında iyileştirilmesi karbon ayak izinin azaltılması, atık ısının geri kazanılması ve yeniden tesis içinde kullanılmasıyla mümkündür.

Kojenerasyon, tek bir enerji kaynağından eş zamanlı olarak ısı ve elektrik üretmek için kullanılan bir tekniktir. Böylece enerji kullanımını önemli ölçüde

azalmakta ve geleneksel sistemlerin en büyük dezavantajı olan ısı kayıpları en aza indirilerek verimli çalışan sistemler elde edilmektedir (Dincer and Rosen, 2015). Bir kojenerasyon sisteminin genel enerji verimliliği, yakıtın hem elektriğe hem de faydalı ısı enerjisiye dönüştürülme oranı olarak tanımlanır (Rosen et al, 2005). Çevresel ve ekonomik açıdan faydalı özellikleriyle birlikte kojenerasyon, küresel enerji piyasalarında uzun vadeli beklentilere sahiptir. Son yıllarda kojenerasyon tesislerinde temiz enerji kaynaklarının (yeşil enerji) kullanılması yönünde bir eğilim görülmektedir (Rosato et al., 2013; Horpynko and Senetskyi, 2023; Hai et al., 2023; Taheri et al., 2023). Yeşil enerji güneş, rüzgar, hidroelektrik ve biyokütle gibi çeşitli enerji kaynaklarını kapsamaktadır (Spiru, 2023). Bu enerjiler iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılmasının yanında gelecek nesilleri koruyarak enerji ihtiyacının karşılanması için sürdürülebilir bir seçenek sunarlar. Bu kaynaklar arasında, organik atıklardan elde edilen ve çevre dostu olan biyogaz, çevresel kaygıların azalması ve daha yeşil bir geleceğe katkıda bulunulabilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Biyogaz, tarımsal atıklar, gıda artıkları gibi organik maddelerin anaerobik (oksijensiz) ortamda inorganik sindirimi yoluyla üretilir ve bileşimi girdi malzemesine göre değişkenlik gösterir (Bhatia, 2014; Qian et al., 2017). Bununla birlikte yanıcı bileşen olan metan biyogazın ısı değerini doğrudan etkilemektedir. Anaerobik çürüme sırasında sera gazı olan metan yakalanarak atmosfere salınımı önlenir ve küresel ısınma üzerindeki etkisi azaltılır (Zaks et al., 2011).

Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak biyogazdan yararlanma konusunda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar çevreye duyarlı enerji sistemlerinin benimsenmesi konusunda önemli adımlar atmaktadır.

Bu çalışma, küçük ölçekli biyogaz tesislerindeki kojenerasyon uygulamaları için özel olarak tasarlanmış dört silindirik bir biyogaz motorunun geliştirilmesi ve optimizasyonu üzerine kapsamlı bir içerik sunmaktadır. Biyogaz kullanımını elektrik üretimi ile entegre eden motor, yakıt ekonomisi ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak işletme maliyetlerini ve çevresel etkileri en aza indirirken fakir yanma koşullarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

Aynı zamanda biyogaz motoru uygulamasının ekonomik avantajları da incelenmiştir. Geleneksel enerji üretim teknolojileriyle yapılan karşılaştırmalar, biyogaz motorunun sürdürülebilir ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir seçenek olduğunu ortaya çıkartmaktadır.

Yeşil enerji kaynaklarından biri olan biyogazın benimsenmesi ve uygulamada kullanılması emisyonların azaltılmasına yardımcı olmakla birlikte, organik atıkların verimli bir şekilde yönetilmesi ithalata olan bağımlılığı azaltabilir ve ekonomik büyümeyi teşvik edebilir.

1.1 Genel bilgiler

Biyogaz motorlarının performans ve emisyon özellikleri biyogaz bileşimi, motor konfigürasyonu, sıkıştırma oranı ve ateşleme zamanı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Motor verimliliğinin artırılması konusunda motor tasarımları ile ilgili çalışmalarla birlikte biyogazın bileşimi ve çift yakıt kullanımı ile ilgili öneriler de literatürde mevcuttur (Makareviciene et al, 2013; Zhang et al, 2017; Leykun and Mekonen, 2022; Kriauciūnas et al, 2021; Lalhriatpuia and Pal, 2023).

Simsek ve Uslu (2020), tek silindirli, dört zamanlı, buji ateşlemeli (SI) bir motorda farklı gaz keleşi konumlarında farklı yakıtların (benzin, biyogaz ve LPG) motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı yakıtların kullanımından elde edilen değerler fren termik verimi, silindir basınçları, ortalama gaz sıcaklığı, frene özgü yakıt tüketimi ve emisyonlar (karbondioksit, karbon monoksit, hidrokarbon ve nitrojen oksit) açısından karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, yakıt olarak LPG ve benzin kullanımının emisyon değerlerinde önemli iyileşmeler sağlarken, fren termik verimi, frene özgü yakıt tüketimi ve silindir basınçlarının olumsuz etkilendiğini göstermektedir.

Yoon and Lee (2011), bir dört silindirli bir IDI dizel motorda çift yakıtlı (biyogaz-biyodizel) yanma özelliklerinin egzoz emisyonları ve yanma performansı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çift yakıtlı yanma olayında tek yakıtlı yanmaya göre daha düşük egzoz gazı sıcaklıklarının ölçülmesiyle birlikte iki durum arasındaki farkın yüksek motor yüklerinde arttığı belirtilmiştir. Düşük egzoz sıcaklıkları biyogaz ile şarj sıcaklığının düşmesine ve gecikmeli yanma fazına

bağlanmıştır. Bununla birlikte farklı yüklerde çalıştırılan motorun her test koşulu için çift yakıtlı durumda NO_x emisyonları için oldukça düşük değerler ölçülürken karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonları tek yakıtlı duruma göre daha yüksek mertebelerde ölçülmüştür.

Makarevicene et al. (2013), biyogazın karbondioksit içeriğinin biyogaz ve mineral dizel yakıt karışımıyla çalışan 4 silindirli dizel motorun performansı ve egzoz gazı emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Motorun çalışma rejimi, çevre ortam özellikleri ve diğer ilgili parametreler ECU aracılığıyla değerlendirilerek yakıt miktarı ve enjeksiyon zamanı optimize edilmiştir. İki aşamalı olarak yapılan deneylerde ilk aşamada farklı biyogaz bileşimlerinin egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Deney sonuçları NO_x konsantrasyonunun yakıt karışımındaki metan konsantrasyonu ile orantılı olduğunu ve NO_x dışındaki emisyonların EGR sistemi kullanılmayan çalışmalarda daha düşük olduğunu göstermektedir. İkinci aşama deneylerde ise en yüksek metan içeriğine sahip yakıt kullanılarak enjeksiyon zamanlaması başlangıcının motor çalışma parametreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Isıl verim artırılırken yakıt tüketimi, CO ve HC konsantrasyonlarının ve egzoz dumanının azaltılması için enjeksiyon zamanlamasının kademeli olarak ilerletilmesi önerilirken bu yöntemin NO_x kirliliğini artırması dezavantaj olarak belirtilmiştir.

Legrottaglie et al. (2021), ısıl verimliliğin artırılması ve CO_2 emisyonlarının % 20 civarında azaltılabilmesi amacıyla biyogazla çalışan yenilikçi bir çift yakıtlı sıkıştırılmalı motor önermişlerdir. Dört silindirli, turbo şarjlı, sıkıştırılmalı ateşlemeli (CI) motor, tek yakıtlı ve çift yakıt modlarında çalıştırarak egzoz emisyon özellikleri ve yanma karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Deneysel araştırma sonuçları kendi ürettiği biyogazla çalışan tesiste, önerilen çift yakıtlı motorun kullanılmasının maliyeti ve emisyonları önemli oranda azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte artan HC ve CO emisyonlarının artması sebebiyle özel bir oksidasyon katalizörünün kurulması dezavantaj olarak verilmiştir.

Maakoul et al. (2020), içten yanmalı bir motor kullanan biyogaz kojenerasyon sisteminin matematiksel modellenmesi ve boyutlandırılması üzerine çalışmışlardır. Biyogaz üretim sıcaklığının sistem performansı (üretilen biyogaz hacmi) üzerine

etkisini incelemek üzere sistem matematiksel olarak modellenmiş ve içten yanmalı motorun dinamik modeli oluşturulmuştur. Kojenerasyon ünitesinin dinamik modelinin yanında sistemin kurulacağı yer, en kötü üretim senaryosu gibi durumlar değerlendirilerek inşa etme maliyetleri de dikkate alınmıştır. Araştırma sonuçları sıcaklık düzenlemesiyle birlikte biyogaz üretiminin hızlandığını göstermektedir.

Literatürde oldukça sınırlı olmakla birlikte biyogaz motorları için sayısal modelleme çalışmaları da mevcuttur. Bu çalışmalarda emisyonlar, tasarım ve ısı yükleri ile ilgili analizler yapılmıştır.

Edwin et al. (2023), biyogaz ile çalışan bir motorun emisyon özelliklerini (karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂) ve azot oksit (NO_x)) ANSYS Fluent yazılımında simüle ederek bir SI motorda biyogazın kullanılma potansiyelini araştırmışlardır. Analiz sonuçları biyogazla çalışan motorun emisyonlarının benzinli motora göre önemli miktarda düşük olduğunu göstermektedir. Benzin ve biyogaz modlarında çalışan motorlar için CO, CO₂ ve NO_x emisyonları sırasıyla 0,031; 0,0158; 0,1109 ppm azalmıştır. Bu durum biyogazı içten yanmalı motor uygulamaları için iyi bir alternatif haline getirmektedir.

Bundele et al. (2023), biyogaz yakıtlı SI motora yapılan hidrojen takviyesinin emisyonlara etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonuçları hidrojenin yanma hızı ve silindir içi sıcaklığını artırmasıyla birlikte NO_x emisyonlarını da artırdığı göstermiştir. Bununla birlikte, biyogaz-hidrojen yakıt karışımları için NO_x emisyonları saf metandan çok daha düşüktür. Biyogaza hidrojen takviyesinin emisyonlara etkisinin incelendiği farklı bir çalışmada, azalan karbon oranı ve iyileştirilmiş yanmanın etkisiyle yanmamış hidrokarbon emisyonlarının azaldığı belirtilmiştir (Park et al., 2011). Diğer taraftan sabit bir biyogaz bileşiminde çalışan motorun motor yükündeki artış CO₂ emisyonunu azaltmaktadır (Gupta and Mittal, 2019).

Adamczyk et al. (2020), farklı yakıt karışımlarının bir içten yanmalı motorun çalışma koşulları üzerindeki etkisini incelemek için deneysel ve sayısal çalışmayı bir arada kullanmışlardır. Birbiriyle oldukça uyumlu sonuçlar veren analizlerde sayısal model, test edilen yakıtlar için alev cephesi yayılımını ve kirletici

oluşumunu görselleştirme amacıyla kullanılmıştır. Biyogaz kullanımının bozulmuş erken yanma fazı göstermesi daha uzun süreli yanma, daha düşük verimlilik ve güç tüketimine sebep olmuştur. Bazı durumlarda egzoz stroku sırasında yanma, yüksek HC ve CO emisyonları ile sonuçlanmıştır.

Chandekar and Debnath (2020), yakıt olarak yüksek metan içeriğine sahip bir biyogaz türü olan biyo-CNG kullanan port enjeksiyonlu çift yakıtlı dizel motorda hava ve biyo-CNG karışım özelliklerini araştırmak için port yakıt enjektörlü bir emme manifoldunun geliştirilmesi üzerinde çalışmışlardır. R/D oranının yakıt karışımına etkisi ve akış davranışı analiz edilerek manifoldun farklı konfigürasyonları için basınç, hız, türbülans kinetik enerjisi, sarmallık ve CH₄ oranı gibi parametreleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar R/D oranının 1,75 ve 2 olduğu durumda manifold çıkışına yakın dağılımın düzgün ve homojen olduğunu göstermiştir.

Wu et al. (2011), biyogaz ile çalışan bir motorun pistonunu ANSYS'te modelleyerek sıcaklık dağılımı, ısıl gerilme ve yükleri hesaplamışlardır. Sıcaklık, piston eksenini boyunca yukardan aşağıya doğru ve yanma odasının merkezinden kenarlara doğru azalmaktadır. Bununla birlikte biyogazın ısıl değerinin düşük olması pistondaki ısıl yüklerin normal çalışma durumunda olmasını ve bu nedenle soğumaya zorlamadan çalışmasını sağlamaktadır. Piston tasarımında piston prim yuvasına dikkat edilmemesi durumunda ısıl yükler nedeniyle çatlaklar oluşacağı belirtilmiştir.

Mevcut biyogaz motoru teknolojilerinin ayrıntılı bir incelemesi, küçük ölçekli enerji santrallerindeki mevcut zorluklar ve verimsizlikleri vurgulayarak yeni ve daha güvenilir bir çözüme duyulan ihtiyacın altını çizmektedir.

Fakir yanma, yanma teknolojisi kullanılan kazan, fırın ve içten anmalı motorlar gibi birçok sektörde düşük emisyon ve yüksek verimlilik değerlerinin elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Fakir yanma koşullarında alev sıcaklıklarının düşük olması NO_x oluşumunu azaltacağından çevreyi kirletici emisyonlar da azalmaktadır. Bununla birlikte yakıtın tamamen yanmasıyla birlikte HC ve CO emisyonları da azalacaktır. Bu iyileştirmelere karşılık düşük reaksiyon hızları,

sönme ve kararsızlıklar gibi parametreler uygulamaları zorlaştırmaktadır (Bradley et al., 2011). Striugas et al. (2020), biyogazdan elde edilen sentez gazının düşük ısıl değere sahip gazların doğrudan daha kararlı ve verimli bir fakir yanma sürecini desteklemek için doğrudan kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

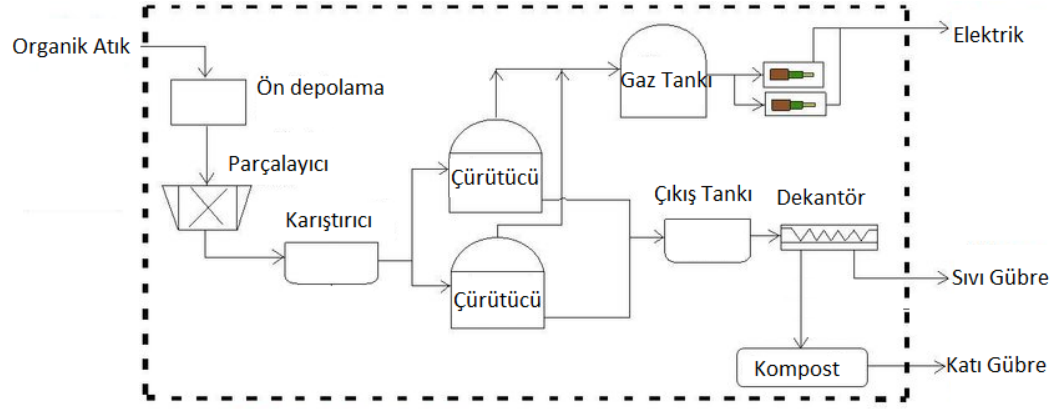
Liu et al.(2020), yakıt olarak biyogaz kullanan bir mikro gaz türbininde yakıt ısıl değerinin, fakir yanma ve tutuşma limitleri üzerine etkisi ile enjektör konumunun ve pilot dağılımının yanma performansı ve emisyonlar üzerine etkilerini yanma havası girişi kütle debisi, basınç ve sıcaklık gibi gerçek çalışma koşullarında test etmişlerdir.

Biyogaz bileşimindeki yüksek H₂S konsantrasyonları, anaerobik çürümeyi engelleyebildiği gibi kojenerasyon ünitelerinde ciddi emisyon ve korozyon sorunlarına da yol açabilmektedir (Prashant, 2020).

1.2 Biyogaz ve biyokimyasal süreç

Anaerobik fermantasyon biyogaz üretim metotları arasında güncel olarak en yaygın kullanılanıdır. Anaerobik fermantasyon oksijensiz ortamda organik materyallerin farklı bakteri kültürleri tarafından ayrıştırılmasına bağlı biyokimyasal bir reaksiyonlar bütünüdür. Biyogazın anaerobik fermantasyon ile üretimi için hayvansal, tarımsal, endüstriyel veya atık su gibi organik içerik barındıran kaynaklar kullanılabilir. Tarımsal olarak gelişmiş ve iklim şartları uygun olan ülkelerde enerji bitkileri de biyogaz üretimine katkı sağlamaktadır. Biyogazın üretilmesinde kullanılan kaynakların atık bazlı olması ve biyogaz üretimi sonrasında atığın miktarının azalması, bununla beraber anaerobik fermantasyon sonrası kalan ürünün, gübre gibi ekonomik değeri yüksek bir emtiaya dönüşüyor olması gibi ekonomik olarak faydalı aktiviteler biyogaz tesislerinin son yıllardaki kurulumlarının artmasını sağlamıştır.

Şekil 1.1’de biyogaz üretim tesisleri için bir örnek bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 1.1 Örnek biyogaz üretim tesisi.

Biyogazın oluşumu biyokimyasal bir süreç olduğundan dolayı, içeriği reaksiyonu etkileyen parametreler ile değişebilmektedir, içeriği genellikle % 40-70 CH₄, % 30 ila 60 CO₂ ve diğer farklı gaz içeriklerinden (N₂, H₂, CO, H₂S) oluşmaktadır (Calle et al., 2007; Deublein and Steinhauser, 2008; Drapcho et al., 2008; Kaporaju et al., 2008). Metan bakterileri anaerobik fermantasyonu esnasında hidrojeni kullandığından biyogaz içerisinde genellikle % 1'in altında bulunur, bunun sebebi serbest hidrojenin CH₄ üretiminde kullanılıyor olmasıdır. CO, biyogaz içerisinde 10-100 ppm seviyesinde yer almaktadır. N₂ ise genellikle % 1'in altında bulunmaktadır. N₂'nin oranının çürütücü içerisinde daha yüksek seyrediyor olması, reaktöre hava girişi olduğunun göstergesidir. H₂S, ise reaktöre giriş yapan maddeler içerisindeki kükürt içeriğine bağlı olarak 100-10.000 ppm arasında bulunabilmektedir (Mitzlaff, 1988; Koçar vd., 2010; Dursun ve Özdemir, 2016).

Biyogaz içeriğindeki CH₄'ün yanıcı olması ile enerji kaynağı olarak yer almaktadır. Biyogaz içeriği biyokimyasal reaksiyonun sonucunda değiştiğinden dolayı, biyogazın kalorifik değeri de sabit olmamaktadır. Biyogaz içeriğindeki CH₄, ve CO₂' in düşük basınçta sıvılaştırılmaması sonucu genellikle bulunduğu yerde farklı enerji formlarına çevrilmektedir, buna en etkin örnek de elektrik enerjisi üretimidir. Son yıllarda ise PSA yöntemi ile gazın içeriğindeki CO₂'in ayrıştırılarak, doğalgaz hatlarına, biyogazdan üretilen metanın basılmasına başlanmıştır. Biyogazın sıvılaştırma basıncı 280-350 bar civarındadır (Koçar vd., 2010). Biyogazın diğer yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleriyle karşılaştırılmasına, Çizelge 1.1'de yer verilmiştir.

Çizelge 1.1 Çeşitli yakıtların özellikleri (Koçar vd., 2010; Pound et al., 1981).

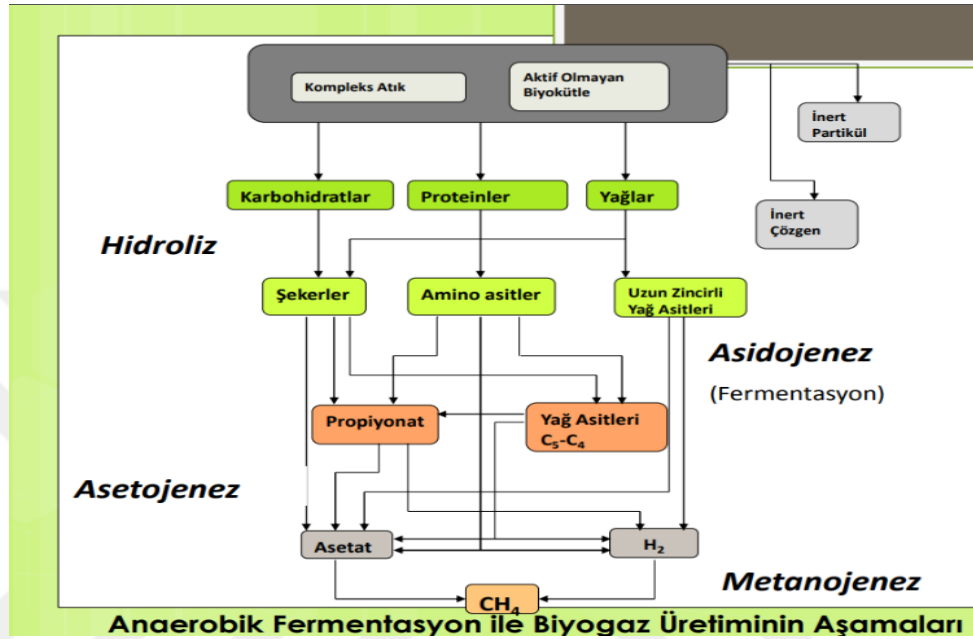
İçerik	Özgül Ağırlık	Alt Isıl Değer (kJ/kg)	Alev Alma Sıcaklığı (°C)	Hacimsel Hava/Yakıt karışımı oranı (kg/kg)	Metan Numarası
Metan	0,72 kg/Nm ³	50000	650	17,2	100
LPG	0,54 kg/l	46000	400	15,5	30
Propan	2,02 kg/Nm ³	46300	470	15,6	35
Bütan	2,70 kg/Nm ³	45600	365	15,6	10
Benzin kontrol	0,75 kg/l	43000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

Biyogaz oluşum süreci hücrelerin oksijensiz solunum prensibi sonucunda uzun zincirli ve yüksek enerji içeren bileşiklerin yıkılıp, daha basit ve daha düşük enerji ihtiva eden bileşiklere çevrilmesidir. Büyük zincirlerin kırılması ile daha düşük formlara indirgenen enerji, organizmalarca tutulup farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Biyotanın beslenmesi için gerekli olan karbon ve enerji olarak ifade edilebilecek iki ana unsur bulunmaktadır. Karbon, hücrelerin yaşamı ve hücresel fonksiyonların sentezlenmesinde kullanılırken, enerji ise başta organizmaların çoğalması için olmak üzere metabolizmada harcanmaktadır. Biyogaz oluşum sürecinin mikrobiyal süreci hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez başlıkları altında dört ana grupta ifade edilmektedir (Koçar vd., 2010; Çallı, 2012; Dursun ve Özdemir, 2016; Parawira, 2004).

Anaerobik fermantasyon süreci organik atıkları oluşturan uzun karbon zincirlerin kırılarak depolimerize hale getirilmesiyle başlamaktadır.

Hidroliz adı verilen bu süreçte; proteinler, aminoasitlere ve peptidlere, karbonhidratlar basit şeker, sakkaritlere, yağlar, yağ asitleri ve gliserole, dönüşmektedir. Bu aşamada organik atıkların ekseriyeti suda çözünür hale gelmektedir (Deublein and Steinhauser, 2008; Karagiannidis, 2012).

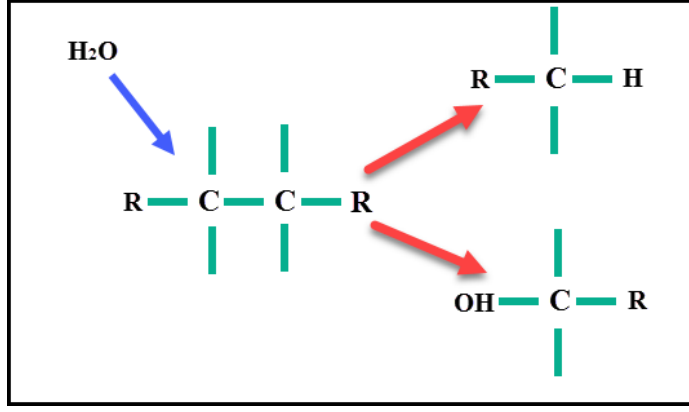
Hidroliz fazı tüm anaerobik fermantasyonun ilk basamağı olduğu (Şekil 1.2) ve sonraki fazların başlangıcını teşkil ettiği için tüm anaerobik fermantasyon sürecinin hızını etkilemektedir. Hidroliz süresinin uzunluğu ve hidrolik bekleme süresi metanojenez fazına geçişi etkilemektedir (Koçar vd., 2010; Awasume and Sathiyaraj, 2011).



Şekil 1.2 Anaerobik fermantasyon akış şeması (Koçar vd., 2010).

Asidojenez fazı, anaerobik fermantasyon aşamaları içerisinde reaksiyonların en hızlı tamamlandığı adımdır. Hidroliz aşamasının reaksiyon çıktıları olan yağ asitleri, amino asitler, basit şekerler, alkoller, organik asitler, propiyonatlar ortaya çıkar (Şekil 1.3) (Türk-Alman Biyogaz Projesi, 2011). Bu aşamada sentezlenen metabolitler asetojenez veya metanojenez fazında kullanılır. Eğer reaksiyonun dengesi bozulursa H₂'in reaksiyonda kullanımı beklenildiği kadar hızlı gerçekleşemez ve buna istinaden farklı çeşitlerde alkoller ve yağ asitlerinin oluşumu artış gösterir (Koçar vd., 2010).

Asetojenez fazı, metanojen bakterilerin kullandığı en önemli girdi olan asetatın üretimini içerir. Sülfidojen ve metanojen bakterilerin üretim çıktısı için asetat gereklidir. Bu fazın çıktıları CH₄ üretimi için çok önemlidir çünkü bu fazda metanojenez için substrat üretilmektedir (Wnxiu and Mengiie, 1989; Asgari et al., 2011; Çelikkaya, 2016;).



Şekil 1.3 Hidroliz reaksiyonu ile küçük moleküllerin oluşumu.

Metanojenез fazı, biyogazın ortaya çıkışındaki son aşamadır. Metan oluşumunu sağlayan metanojenler; hidrojentropik, asetotropik, metilotropik olarak örneklendirilebilir. Metanojenler doğada çürüyen organik içeriklerde, sulu ortam çamurlarında, hayvan veya insan sindirim sistemlerinde bulunabilmektedir. Hidrojen kullanan metanojenler, H₂ ve CO₂'den CH₄ üretirken (% 30 oranında), asetoklastik metanojenler ise asetik asidi ayrıştırarak CH₄ (% 70 oranında) sentezlemektedir. Metanojenез reaksiyon hızını tanımlayan ve anaerobik şartlarda gerçekleşmesi gereken nihai fazdır. Bu fazda görev alan bakteriler, daha önce gerçekleşen fazlarda görev alan bakterilerden farklı olarak daha yavaş gelişmektedir (Koçar vd., 2010).

Biyogaz üretiminde önemli faktörlerin başında çalışma sıcaklığı gelmektedir. Çalışma sıcaklıkları Psikofilik, Mezofilik ve Termofilik olarak üçe ayrılmaktadır. Psikofilik fermantasyon 3-20 °C, Mezofilik fermantasyon 20 ile 40 °C, Termofilik fermantasyon ise 40-70 °C aralıklarında gerçekleşir.

Psikofilik bölgede bekleme süreleri 100 ila 300 gün aralığında seyretmektedir ve ideal TK oranı % 5 civarındadır, düşük sıcakta biyogaz üretimi aşırı yavaşlamaktadır.

Mezofilik bölgede bekleme süresi 20 ila 40 gün aralığındadır, optimum çalışma sıcaklığı ise 37 °C civarındadır, mezofilik fermantasyonda stabil üretim için çürütücü ortam sıcaklığının saatlik dalgalanmasının 1°C'yi geçmemesi

gereklidir. Biyogaz tesislerinde en çok kullanılan anaerobik fermantasyon bölgesidir.

Termofilik bölgede bekleme süresi 10-15 gün aralığındadır ve reaktör hacimleri çok daha düşüktür. Optimum çalışma sıcaklığı 55-60 °C aralığındadır. Isı girdi ihtiyacının yüksek olması ve sıcaklık kontrolünün daha hassas yapılması gerekliliği sebebiyle daha az tercih edilmektedir.

Biyogaz sistemlerinde optimum pH seviyesi 6,8 ila 7,2 aralığıdır, karıştırmanın düzgün sağlanması, reaktör içerisinde homojenitenin sağlanması, sıcaklık dağılımının eşitlenmesi, köpük kırılması ve askıda katı maddenin eşit dağılması için önemlidir.

Biyogazın biyokimyasal bir üretim süreci olması sebebiyle, anlık tüm parametrelerin kontrol altında tutularak, sistemin girdilerinin kontrol edilmesi sistem veriminin sağlanması açısından zaruridir.

1.3 Biyogaz üretiminde kullanılan materyaller

Organik içeriği olan pek çok madde biyogaz üretiminde hammadde girdisi olarak kullanılabilir. Bunlar tarımsal, hayvansal, endüstriyel ve atık su içerikli olabilmektedir (Demirbaş ve Öztürk, 2005). Ülkemizde biyogaz üretiminde öncelikli olarak büyükbaş ve kanatlı hayvanların gübreleri, mezbaha atıkları ve bertaraf edilmesi gerekli olan organik içerikli atıklar ile nadiren bitkisel atıklar organik hammadde olarak kullanılmaktadır. Bitkisel atıklarda ise lignin yapı kırılmadan kullanılabilir ürünler tercih edilmektedir. Ülkemizde yem fiyatlarının yüksek olması tarımsal atıkların kullanım alanındaki önceliğini yurtdışından ayırmaktadır, bu da biyogaz tesislerinde daha çok hayvansal atık girdisinin kullanılmasına sebep vermektedir.

Biyogaz üretimine organik girdiler içerisinde; organik yağlar, proteinler ve karbon hidratlar yüksek katkı sağlamaktadır. Biyogaz üretiminde kullanılan farklı organik materyallerin TK madde oranları, UK madde oranı ve biyogaz verimlerine ilişkin bilgiler Çizelge 1.2'de listelenmiştir.

Hayvansal atıkların ve bununla beraber katkı olarak eklenen organik atıkların biyogaz üretimine ilişkin kabul edilen değerler ise Çizelge 1.2’de paylaşılmıştır.

Çizelge 1.2 Çeşitli materyallerin biyogaz özellikleri (Eryaşar, 2007; Koçar vd., 2010; Luostarinen et al., 2011; Anonim 2, 2015; Marchaim, 1992).

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

1.4 Biyogazın kullanım alanları

Biyogaz olarak adlandırılan gaz karışımı içeriğindeki CH₄ sayesinde kullanılabilir seviyede yanıcı içeriğe sahiptir. Biyogaz bu sebeple genel olarak elektrik üretimi, daha nadir olarak ise ısı üretimi maksatlı olarak kullanılmaktadır. Biyogazdan elektrik eldesi esnasında ısı da ortaya çıktığından dolayı ve birim elektrik kWh fiyatının, birim ısı kWh’ından yüksek olması sebebiyle öncelikli olarak elektrik üretimi tercih edilmektedir. Biyogaz üretimi için gerekli olan ısının da kaynağı genellikle elektrik üretimi esnasında ortaya çıkan atık ısıdır. Biyogaz üretim tesisin kurulu bulunduğu iklim ve sistem konfigürasyonuna göre değişmekle birlikte biyogazdan elektrik üretimi esnasında ortaya çıkan ısı miktarı termofilik sistemlerde dahi gerekli tüm ısıyı karşılayabilmekte, bunun dışında da gübre kurutma gibi sistemlerde de ısıl kaynak olarak kullanılabilir. Biyogaz son

yıllarda Avrupa ülkelerinde ortaya çıkan gaz temin krizi sebebiyle saflaştırılarak, doğalgaz hatlarına basılmaya da başlanmıştır.

Küçük ölçekli biyogaz sistemlerinde ise üretilen gaz, elektrik üretimi maksadı dışında ısıtma amaçlı olarak fırınlarda, ocaklarda veya su ısıtma sistemlerinde de hava gaz karışımı ayarlanarak kullanılabilir. Bu kullanımın sağlıklı yapılabilmesi adına dikkat edilmesi gereken husus, özellikle yoğunlaşma ihtimali olan sistemlerde gazdaki H_2S 'in yanma sonucunda SO_4 'e dönüşümü sebebiyle egzoz hatlarında oluşabilecek korozyondur. Bu sebeple üretilen biyogazın şartlandırılarak temizlenmesi kullanılan ekipmanların ömrünü uzatabilmek adına önemlidir.

Atıkların doğada fermantasyona uğraması sebebiyle doğaya sera gazı emisyonları yayılmaktadır, biyogazın ise girdisi atıklardır ve bu atıkların doğaya salacağı sera gazı emisyonlarının kontrollü bir şekilde biyogaz üretiminde kullanılması ve H_2S 'den arındırılarak enerji üretimi sonucunda CO_2 olarak doğaya salınması, fosil kaynaklardan üretim yapıldığında salınacak sera gazı emisyonlarına nazaran toplam karbon ayak izi etkisi açısından çevreci bir çözüm ortaya koymaktadır.

Biyogaza ait teorik çığ noktası sıcaklığı $121^\circ C$ 'dir. Biyogazın içindeki CO_2 hava yakıt karışım oranına tesir etmektedir. Motor dışı yanma reaksiyonlarında stokiometrik yanma sağlanması gerekir. H_2S 'ün yanma sonucunda SO_2 ve SO_4 gazlarına dönüşümü sebebiyle, egzoz gazında korozif etki ortaya çıkmaktadır.

Biyogazın konvansiyonel yöntemler ile yakılabilmesi için kalorifik değerinin 3500 kcal/m^3 'ün üzerinde olması gerekir, bunun altındaki değerler için ise verimli yanma sağlanabilmesi adına gerek efektif hacim kaybı gerekse alev hızı düşüşü sebebiyle, yakma ekipmanlarında tasarımsal değişiklikler gerekmektedir.

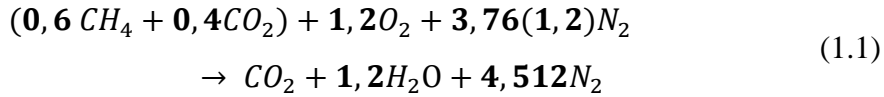
İçten yanmalı motorlar günümüzde biyogaz yakıtından elektrik enerjisi elde etmenin en efektif metodu olarak kullanılmaktadır. İlk yatırım maliyetinin diğer alternatiflere göre düşük olması, bakım masraflarının birim üretilen kWh bazında makul olması, tamir kolaylığı ve termik veriminin yüksek olması, içten yanmalı motorların biyogazdan elektrik enerjisi üretiminde öne çıkmasına sebep olmaktadır.

Gaz türbinleri de biyogaz yakıtından elektrik enerjisi üretiminde kullanılabilir. Gaz türbinlerinin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, elektrik veriminin düşük olması ve işletme masrafinin düşük olmasına rağmen, arıza durumunda tamir masrafinin yüksek olması sebebiyle içten yanmalı motorlar kadar tercih edilmemesine sebep olmuştur.

Stirling motoru, dıştan yanma ile, gazların sıcaklık değişimlerinin hacim değişikliğine sebep olması prensibine bağlı olarak çalışmaktadır. Dış yanma sonucunda ortaya çıkan sıcaklık, Stirling motorlarının ihtiyacı olan dış ısıyı sağlayarak sıcaklık farkından kinetik enerji üretimini sağlamaktadır. Dıştan yanmanın getirdiği en büyük avantaj gazın içeriğindeki H₂S sebebiyle motorun korozyona uğrama riskinin bulunmamasıdır. Buna karşın dıştan yanma prensibi ile çalışan motorların termik verimleri, içten yanma prensibi ile çalışan motorların verimlerine göre düşüktür (% 20-26). Toplam ekonomik faydasının düşük olması sebebiyle, tercih edilmemektedirler.

1.5 Biyogazın teorik yanma denklemi

Atmosferin yaklaşık olarak % 79' u azot (N₂) ve % 21' i oksijen (O₂)' den oluşur. Dolayısıyla, azot ve oksijenin molar oranı kabaca 3,76'dır.



Buna göre 1 m³ biyogazın tam yanması için gerekli oksijen miktarı;

$$1,2 O_2 + 4,512 N_2 = 5,712 \text{ mol olarak hesaplanmaktadır.}$$

Biyogazın içeriğinde bulunan CO₂ yanma denkleminden reaksiyona girmeden çıkmaktadır, yanma üzerinde alev hızını yavaşlatıcı etkisi vardır.

Bu sebeple biyogazın alev hızı, doğalgaza göre düşüktür. % 60 oranı CH₄ içeriği olan biyogazın alev hızı 0,25 m/s iken % 100 CH₄'te bu oran 0,37m/s'dir.

Biyogazın yanması sırasında gaz içeriğinde bulunan H₂S tepkimeye girerek SO₂ ve H₂O'ya dönüşmektedir. Egzoz ısısının da tesiriyle SO₂, H₂O ile reaksiyona

girerek H_2SO_3 (sülfürik asit) oluşur. Egzoz emisyonları ile oluşan bu asitler motor parçalarında ciddi aşınmalara, motor yağında bozunmaya ve motorun ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır (Kuhnke, 2008; Koçar vd., 2010).

H_2S gazının biyogazın içinden giderimi için farklı metotlar mevcuttur. Bunların başlıca olanları;

- Biyolojik desülfürizasyon
- Kimyasal desülfürizasyon
- Aktif karbon filtrasyonu
- Biyogaz reaktörünün içine hava dozajlaması
- Demir diklorür veya demir triklörür dozajı
- Demir hidroksit filtrasyonu
- Demir oksit filtrasyonu
- Zeolit filtrasyonu
- Su ile filtrasyon olarak sıralanabilir.

Büyük ölçekli tesislerde işletme maliyeti olarak en düşük H_2S giderim yöntemi biyolojik desülfürizasyondur. Bu sistemin dezavantajı, daimî bir biyogaz akışına ihtiyaç duyması ve dolgu malzemelerinde biriken elementer kükürdün belli aralıklarla temizlenmesi gereğidir. Desülfürizasyon kulesi içerisinde biyokimyasal bir süreç yaşandığı için prosesin hassas bir şekilde takibi gereklidir. İşletim için tek gereklilik, gübre ve sıcak su ile, pH dengesinin sağlanmasıdır.

Kimyasal desülfürizasyon çok iyi H_2S giderimi sağlayan bir yöntem olmasına karşın, ihtiyaç duyduğu NaOH'in maliyeti ve H_2S dışında CO_2 ile de bağ yapması sebebiyle çok yüksek işletme giderine sebep olmasından dolayı tercih edilmemektedir.

Aktif karbon, düşük ilk kurulum maliyeti sebebiyle küçük ölçekli sistemlerde tercih edilmektedir, iyi bir aktif karbon kendi kütlesine eşit miktarda H_2S bağlayabilmektedir, aktif karbonun işlevini yerine getirebilmesi için biyogaz içeriğindeki suyun yoğunlaştırılarak alınması gereklidir.

Biyogaz reaktörünün içine hava dozajlanması ile çürütücü üzerine gerilen ağ üzerinde bulunan *Sulfobacter oxydans* bakterisi ile biyolojik desülfürizasyon sağlanır.

Demir diklorür veya demir triklorür dozajı yapıldığında reaktör içerisinde demir sülfat oluşur. Bu sistemde çürütücü içerisinde korozyona karşı önlemler alınmalıdır.

Demir hidroksit filtrasyonunda biyogaz katı demir hidroksit içerisinden geçirilir, demir hidroksit sıcak hava ile tekrar rejenere edilerek kullanılabilir, fakat her rejenerasyonda %10 kapasite kaybı beklenmelidir.

Demir oksit filtrasyonu, demiroksitin pelet haline getirilmiş hali içerisinden biyogazın geçirilmesi ve reaksiyon sonucunda demirsülfür olarak H_2S 'ün bağlanması prensibine bağlıdır, en eski uygulanan yöntemlerden birisidir, fakat maliyet ve reaksiyon esnasında ortaya çıkan ısı dezavantajlarıdır.

Zeolit filtrasyonunda, aktif karbonda olduğu gibi H_2S zeolit gözeneklerinde bağlanarak biyogazdan ayrıştırılır, siloksan temizliğinde de kullanılabilirdiğinden çöp gazı ve arıtma tesislerinde tercih edilebilmektedir. Maliyeti sebebiyle yaygın kullanılmamaktadır.

Su ile filtrasyon tekniğinde ise biyogaz suyun içinden geçirilerek, H_2S 'ün suda çözünmesi sağlanmaktadır, dezavantajı ise ciddi miktarda su tüketimine sebep olmasıdır.

1.6 Biyogazın tarihsel kullanım süreci

Biyogazın tarihteki bilinen kullanımını öncelikle Asya kıtasında başlamıştır, Marco Polo'nun 13. Yüzyılda Asya'daki seyahatnamelerinde biyogazın aydınlatma amacıyla kullanıldığına dair notları mevcuttur. Ancak, modern biyogaz tesislerinin ilk örnekleri 19. Yüzyıla dayanmaktadır.

Avrupa kıtasında ilk biyogaz tesisi 1895 yılında İngiltere, Exeter şehrinde inşa edilmiştir. Bu tesisin yapım amacı biyogazın çevresel etkilerini araştırmak ve

organik atıkların yönetimi için çözüm sunmak olmuştur. Bu tesis daha sonrasında yapılan tesislere iyi bir örnek ve öncü olmuştur (Angelidaki ve Ellegaard, 2003).

Louis Pasteur'un mikroorganizmalar üzerine yaptığı çalışmalar, biyogaz üretiminin anlaşılmasında önemli bir rol oynamıştır.

Tesiste üretilen biyogaz ile şehrin sokak lambalarında aydınlatma yapılması sağlanmış ve biyogazın potansiyel kullanım alanları değerlendirme noktasında bir örnek teşkil etmiştir (Levine et al., 1984).

20. Yüzyılın ortalarında petrol kullanımının yaygınlaşması ile birlikte biyogaz kullanımı sekteye uğramış olsa da bu tarihe kadar çeşitli kullanım alanları değerlendirilmiştir (Braun et al., 2009).

1970'li yılların sonrasında yaşanan enerji krizi ise biyogazın içten yanmalı motorlarda bir yakıt olarak yeniden gündeme alınmasına sebep olmuştur (Deublein and Steinhauser, 2008).

Bu yıllarda yapılan çalışmalar sebebiyle biyogazın içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılmasıyla alakalı olarak pek çok patent başvurusu yapılmıştır.

1980'li yılların başında yapılmış olan çalışmaların pek çoğu dizel motordan, Otto çevrimine uyarlanan motorlar üzerinde yapılan çalışmalar üzerine olmuştur. 1981 yılında Neyeloff ve Cunkel tarafından yapılan çalışmalarda ideal sıkıştırma oranı üzerine yapılan çalışmalarda 15:1 değeri elde edilmiştir (Neyeloff and Cunkel, 1981; Thring, 1985). Aynı yıl içerisinde Hickson dizel motorda yaptığı revizyon sonucunda biyogaz ile çalışan bir motor yapmış ve motorun mekanik gücünde dizel motora nazaran %35 güç düşümü ölçmüştür.

1985 yılında, Avusturya merkezli Jenbacher firması, biyogazı yakıt olarak kullanabilecek ilk endüstriyel ölçekte gaz motorunu tasarlamış ve üretmiştir (Liebetrau et al., 2013). Bu önemli teknolojik gelişme biyogaz ve çöp gazının içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı potansiyelini artırmıştır.

Sonraki yıllarda gerek biyogaz gerek çöp gazının yakıt olarak içten yanmalı motorlarda kullanımıyla alakalı çalışmalar sonucunda hem gaz kalitesinin artırımı hem de motorların bu gazlarla emniyetli ve verimli çalışmasının sağlanması adına çalışmalar devam etmiştir.

1.7 İçten yanmalı motorlarda biyogaz kullanımı

Biyogaz buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak kullanılabilir, fakat doğalgaza göre içeriğinde bulunan CO₂ sebebiyle yanma karakteristiği olarak farklılık göstermektedir, bu da biyogaz motorlarının en yakın yakıt özelliklerine sahip olan doğalgaza göre farklılık göstermesine sebep olmaktadır (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3 Biyogaz ve doğal gaz yakıtlarının karşılaştırılması

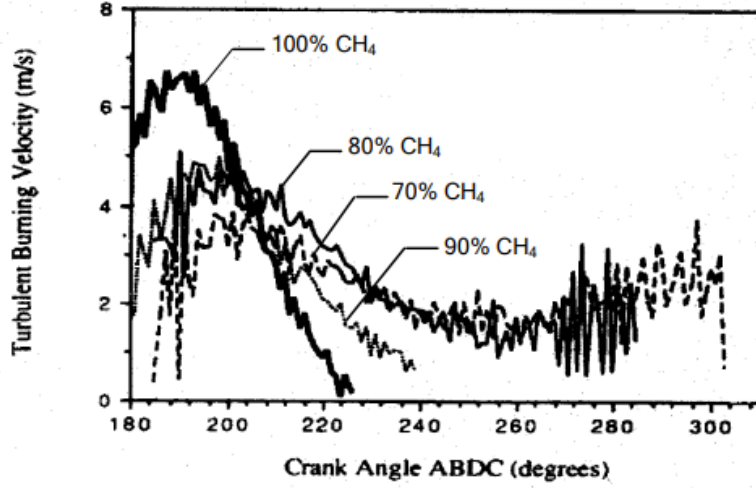
Değerler	Birim	Biyogaz (%60 CH ₄)	Doğalgaz
Alt Isıl Değer	MJ/m ³	20-22	36
Özgül Ağırlık	kg/ m ³	1,24	0,83
Çiğlenme Noktası	°C	80-140	60
Stokiyometrik Oran	m ³ / m ³	5,7	9,54
Alev Hızı	m/s	0,25	0,39

Biyogaz içerisinde bulunan CO₂ sebebiyle biyogazın stokiyometrisi doğalgazdan farklıdır, CO₂ yanma esnasında tepkimeye girmediğinden dolayı alev hızında ve yanma basıncında düşmeye sebep olur, silindir içinde yanma basıncı da buna bağlı olarak düşer. Yanma fakirleşmeye devam ettikçe yanma basıncı daha da düşer. Huang yaptığı çalışmalarda ideal sıkıştırma oranını %40 CO₂ oranında 13:1 olarak kaydetmiştir (Huang,1998)

Hava yakıt karışımının doğru ayarlanması egzoz emisyonlarının kontrolü ve ideal yanmanın sağlanması açısından öneme sahiptir. Yakıt içerisindeki CO₂ arttıkça stokiyometrik oran düşmektedir. Yakıt içerisindeki CO₂ oranı hava yakıt karışımını sağlayacak mikser ve enjektörlerin hacim hesaplarının yeniden yapılmasını gerektirmektedir.

CO₂'in varlığı biyogazın alev hızını düşürmektedir, bunun dışında CO₂'in özgül ısısı yanma esnasında sıcaklığın yükselmesi ile birlikte parabolik artmakta,

bu da yanma sıcaklığına bağlı olarak, yanma sonucu ortaya çıkan enerjiden daha fazla pay almasına sebep olmaktadır (Karim G. 1992). Yakıt içeriğinde bulunan CO₂ türbülanslı yanma hızının düşmesine de sebep olmaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 CH₄: CO₂ oranının Türbülanslı Yanma Hızına Etkisi (Whiston P, 1992)

Biyogazda alev hızının yavaşlıyor olması yanma sürecini uzatmakta, buna bağlı olarak biyogazın yakıt olarak kullanıldığı motorlarda ateşleme zamanı daha erkene kaymaktadır, bunun sebebi yanma sürecinin uzamasıdır, bu şekilde yanmanın tam sağlanması amaçlanmaktadır.

CO₂'nin yakıtın içinde kapladığı hacim sebebiyle volümetrik ısı değerinde düşmeye sebep olmasının bir diğer sonucu da motorların çıkış gücünde düşüştür. Buna karşın CO₂'nin yanmayı yavaşlatıcı etkisi sayesinde turboşarj beslemeli motorların sıkıştırma oranları doğalgaz yakıtlı motorlara nazaran daha fazla artırılabilen ve motor çıkış güçlerinde düşüş engellenebilmektedir.

Yanma sonucunda ortaya çıkan NO_x açısından biyogazın değerlendirilmesi durumunda ise yine CO₂'nin yanma sürecini uzatıcı ve yanma sıcaklığını düşürücü etkisi öne çıkmaktadır, yanma odasında NO_x formasyonunun temel etkin sebepleri yanma sıcaklığı ve basıncıdır. Biyogaz motorlarında sıkıştırma oranının yükseltilmesi her ne kadar NO_x emisyonlarını bir miktar daha yükseltici etkiyi barındırır da bu sayede günümüzde aynı hacimdeki doğalgaz ve biyogaz

motorlarından aynı emisyon seviyesinde aynı mekanik çıkış gücü elde edilebilmektedir.

CO emisyonları açısından fakir yanmalı motorlarda doğalgaz veya biyogaz yakıtlı motorlar açısından kayda değer bir fark görülmemiştir (Huang,1998). SO_x emisyonları ise direkt olarak motor yağı ve yakıt içeriğindeki kükürt bileşiklerinin oranı ile bağıntılıdır.

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

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

saflaştırılmamış biyogaz kullanıldığında, gaz debisinin daha yüksek tutulması gerekmektedir.

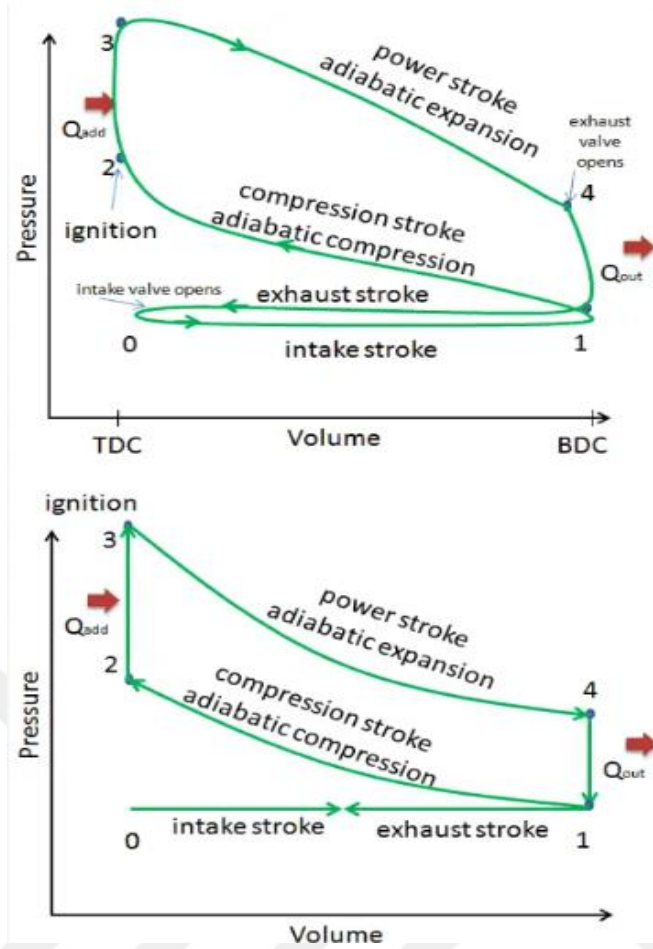
1.8 Kıvılcım ateşlemeli motor teorisi

Kıvılcım ateşlemeli (Spark Ignition-SI) motorlar özellikle otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanımda olan içten yanmalı motorların alt çeşitlerinden birisidir. Sıvı veya gaz fazındaki yakıtların, uygun hava karışımı ile yanma odasına gönderildikten sonra, elektriksel bir kıvılcım ile ateşlenerek yanmasını başlatarak enerji üretimi yaparlar (Heywood J.B. 1988).

Kıvılcım ateşlemeli motorlar da iki veya dört zamanlı olabilir. Dört zamanlı motorlarda sırayla; emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz zamanlamalarına göre çevrim devam eder.

Emme zamanında yanma odasına çekilen hava yakıt karışımı, sıkıştırma zamanında piston tarafından sıkıştırılır, sonrasında sıkıştırılan bu karışım yanma zamanında buji tarafından ateşlenir ve yanma başlatılır. Yanma sonucunda ortaya çıkan yüksek basınç pistonu aşağıya iter ve mekanik enerji üretilir. Egzoz zamanında yanma sonucunda ortaya çıkan yüksek sıcaklık içeren egzoz gazları dışarıya atılır (Stone, 1992).

Kıvılcım ateşlemeli motorlarda kullanılan Otto çevirimi 1976 yılında Nikolaus August Otto tarafından geliştirilmiştir. Bu çevrim idealize edilmiş bir çevrimdir ve gerçek P-V diyagramından farklılık gösterir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Gerçek ve ideal Otto çevrimleri (Anonim 1)

İdeal Otto çevrimi, zamanlar arasındaki geçişin anlık olabileceği kabulüne göre bir P-V diyagramı ortaya koyarken, gerçek çalışma şartlarında bu geçiş süreci içerisinde olmaktadır. Şekil 1.5'te görüleceği gibi 0-1 aralığında emme zamanında emme supaplarının açılması ile birlikte yanma odasına hava yakıt karışımı girmektedir, bu süreçte piston üst ölü noktadan, alt ölü noktaya doğru hareket etmektedir. 1-2 aralığında ise piston yeniden alt ölü noktadan, üst ölü noktaya kadar hava yakıt karışımını sıkıştırarak hareket eder. Bu işlem esnasında ek bir ısı işlem uygulanmadığından dolayı adyabatik süreç de denir.

2-3 aralığında, 2. Noktada buji tarafından ateşleme sağlanarak yanma başlar ve yanma sonucunda yükselen basınç genişleme sonucunda pistonu iter. 3-4 aralığında yanma sonucunda oluşan basınç, pistonu üst ölü noktadan alt ölü noktaya doğru iter ve termal enerji, mekanik enerjiye çevrilir. 4-1 aralığında yanma sonucunda ortaya çıkan ısı transfer olur ve basınç azalır. 1-0 aralığında oluşan egzoz gazları yanma odasından tahliye edilir.

2. MATERYAL VE METOD

Prototip üretimi sağlanan biyogaz yakıtlı kojenerasyon sisteminin imalat ve test işlemleri Teksan Jeneratör (İstanbul) fabrikasında yapılmıştır.

2.1 Materyal

Kojenerasyon uygulamasına uygun dört silindirli bir biyogaz motorunun geliştirilmesi hedefiyle başlanılan bu tez çalışmasında 48 kW mekanik çıkış gücü olan bir motorun tasarımına başlanmış ve motorun prototiplemesi yapılmıştır.

2.1.1 Deney motoru

Deneylerde 4304G model, ventüri mikserli, su soğutmalı, turboşarj intercooler emişli ve dört zamanlı prototip biyogaz motoru kullanılmıştır. Şekil 2.1’de deneyde kullanılan motorun genel görünümü ve Çizelge 2.1’de motorun genel özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Deney Motoru.

Çizelge 2.1 Deney motoru teknik özellikleri.

Karıştırma sistemi	Ventüri Mikser
Silindir sayısı	Sıra tip 4 silindir
Silindir çapı (mm)	104
Strok (mm)	115
Hacim (cc)	3900
Sıkıştırma oranı	13:01
Maksimum güç (kW)	48
Motor devri (d/d)	1500
Besleme tipi	Turboşarj intercooler
Ateşleme zamanı	18° ÜON önce

2.1.2 Alternatör

Jeneratör setinde Leroy Somer marka LSAC 44.3 S2 model bir alternatör kullanılmıştır (Şekil 2.2). Testler rezistif bir yük bankasında gerçekleştirildiği için güç faktörü ($\text{Cos } \phi$) değeri 1 olarak alınmıştır.



Şekil 2.2 Alternatör genel görünümü.

Kullanılan alternatöre ait güç faktörü ve yük bağımlı verim değerleri Çizelge 2.2’de, diğer teknik veriler ise Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Alternatör verim değerleri

Model	Güç kW	Yük ($\text{Cos } \phi=1$)			
		% 25	% 50	% 75	% 100
LSAC 44.3 S2	41	86,6	92	93,6	94,1

Çizelge 2.3 Alternatör teknik verileri.

Faz Sayısı	3
Gerilim (V)	400
İzolasyon Sınıfı	H
Sargı Adımı	2/3
Uç Sayısı	12
Koruma Sınıfı	IP23
Aşırı Hız (rpm)	2250
Uyartım	AREP
Gerilim Regülasyonu	% 0,50
Kısa Devre koruması (%)	300

2.1.3 Yük bankası

Jeneratör setinin yk testlerinin yapılabilmesi için otomasyon kontrollü hava soğutma, rezistif bir yük bankası kullanılmıştır. Bu şekilde 1kW çözünürlük ile motora yk verilmesi sağlanmış ve yk testleri yapılmıştır. Kullanılan yük kontrol paneli şekil 2.3’de görülmektedir.



şekil 2.3 Yük bankası kontrol paneli

2.1.4 Baca gazı emisyon cihazı

Deneylerde baca gazı emisyon değerleri MRU Optima 7 model emisyon cihazı (şekil 2.4) ile llmştir.



Şekil 2.4 Baca gazı ölçüm cihazı.

Cihaz ile ölçülebilen gazlar ve ölçüm aralıkları Çizelge 2.4’te verilmiştir. Ölçüm için CO₂ sensörü IR yöntemi, diğer sensörler ise elektrokimyasal yöntemleri kullanmaktadır. Cihazda bulunan dahili basınç sensörü ve termokupl probu ile egzoz için geri basınç ve sıcaklık değerleri de kaydedilmiştir.

Çizelge 2.4 Ölçüm yapılabilen gazlar ve ölçüm aralıkları

Gaz	Ölçüm aralığı
O ₂	0 – 21,00 (%)
CO ₂	0 – 20,00 (%)
CO	0 – 1000 ppm
NO	0 – 5000 ppm
NO ₂	0 – 1000 ppm
NO _x	0 – 5000 ppm
Baca gazı sıcaklığı	<1100 °C
Lambda (λ)	0-3
Geri Basınç	0-200 mBar

2.1.5 Gürültü emisyonu ölçüm cihazı

Biyogaz motorunun akustik ölçümleri Delta Ohm marka HD2010 model cihaz (Şekil 2.5) ile yapılmıştır.



Şekil 2.5 Akustik ölçümleri için kullanılan cihaz.

Deneysel çalışma öncesinde cihaz kalibre edilmiştir ve testler tamamlanana kadar başka bir ölçümde kullanılmamıştır. Kullanılan ses seviyesi ölçer için özellikler Çizelge 2.5’de verilmiştir.

Çizelge 2.5 Ses seviyesi ölçer özellikleri.

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

2.1.6 Termal kamera

Biyogaz motorundan yayılan ısı enerjisinin takip edilebilmesi amacıyla motor parçalarının sıcaklıkları FLIR E40 termal kamera (Şekil 2.6) ile izlenerek kaydedilmiştir.



Şekil 2.6 Çalışmada kullanılan termal kamera.

Yüzey sıcaklıklarının hava/yakıt karışımı ve soğutma sistemine bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Cihazın teknik verileri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Kullanılan termal kamera için teknik özellikler.

Marka-model	FLIR E40
Çözünürlük	160x120 piksel
Uzaysal çözünürlük	2,72 mrad
Hassasiyet	< 0,07 °C
Ölçüm aralığı	-20 °C ile + 120 °C, 0 °C ile +650 °C
Spotmetre	3
Odak Mesafesi	25° x 19° / 0,4 m
Spektral alan	7,5-13 µm
Çalışma sıcaklığı	-15 °C ile +50 °C
Bağıl nem	IEC 60068-2-30/24 saat %95

2.1.7 İvmeölçer ve veri kayıt sistemi

Montaj işlemleri tamamlanan jeneratör seti çalışma devri ve frekansında nominal yükte çalıştırılarak ISO 8528-9 standardına uygun biçimde test edilmiştir. Titreşim ölçümünde Dewesoft firmasına ait Dewe-43A model veri toplayıcı ve 3 eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar Teksan Jeneratör periyodik kalibrasyon programı kapsamında bağımsız kuruluşlarca kalibre edilmiştir. Motor ve alternatör ayakları, şasi ve kabin üzerinden titreşim ölçümleri alınmıştır. İvmeölçer düzeneğine ait uygulama ve veri ölçüm noktaları Şekil 2.7 (a-c)'de gösterilmektedir.

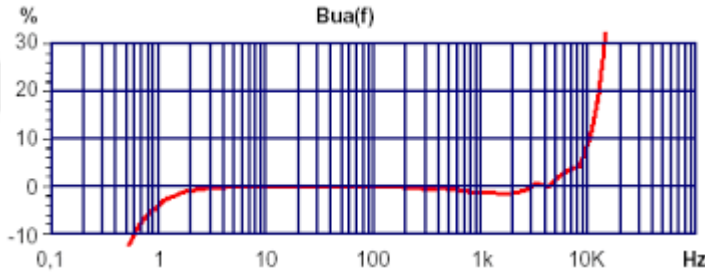


Şekil 2.7 (a, b, c) İvmeölçer düzeneğinin genel görünümü

Dewe 43A ve buna bağlı çalışan MMF KS80C model piezoelektrik ivmeölçer Titreşim sensörüne ait teknik bilgiler, Çizelge 2.7'de, kullanım ile ilgili genişleme eğrisi, Şekil 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.7 Üç eksenli ivmeölçer sensörü teknik özellikleri.

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



Şekil 2.8 MMF KS80C model titreşim sensörü genişleme eğrisi.

2.1.8 Gaz sayacı

Biyogaz motorunun yakıt tüketiminin belirlenebilmesi için Şekil 2.9’da genel görünümü verilen Elster Marka G25 model körüklü sayaç kullanılmıştır (Çizelge 2.8). Elde edilen veriler jeneratörün kontrol ünitesine de aktarılmıştır. Tüketim değerleri (m³) K düzeltme katsayısı ile düzeltilmiştir. Bununla birlikte gaz hattındaki basınç ve sıcaklık değerleri de kaydedilmiştir. Düşük gaz basıncı nedeniyle düzeltici kullanılmamıştır.

Çizelge 2.8 G25 model körüklü tip sayaç için teknik veriler.

Temel Özellikler	G25
Maksimum akış miktarı (m ³ /h)	40
Minimum akış miktarı (m ³ /h)	0,25
Nominal akış oranı (m ³ /h)	6
Çevrimsel hacim (litre)	12
Maksimum çalışma basıncı (bar)	0,5



Şekil 2.9 Körüklü gaz sayaçları için genel görünüm (G25 model)

2.1.9 Doğalgaz özellikleri

Biyogaz yakıtının kısıtlı olması sebebiyle motorun çalışma testleri doğalgaz ile gerçekleştirilmiştir. İğdaş tarafından sağlanan doğalgaz özellikleri Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9 Doğalgazın kimyasal özellikleri (İğdaş).

Özellik	Değer
Metan	95 %
Etan	2,70 %
Propan	0,94 %
Bütan	0,38 %
Pentan vd. ağır karbonlar	0,10 %
Karbondioksit	0,19 %
Azot	0,50 %
Alt ısııl değer (Mj/m ³)	35,5
Yoğunluk (kg/m ³)	0,59

2.1.10 Özel karışım biyogaz

Saha testlerine başlamadan önce kontrollü ortamda yapılacak deneyler için HABAŞ firmasından sentetik biyogaz (% 60 CH₄ + % 40 CO₂) tedarik edilmiştir. Yakıt besleme tesisatında kullanılan biyogazın özellikleri Çizelge 2.10'da verilmiştir.

Çizelge 2.10 Biyogazın özellikleri.

Özellik	Değer
İçerik	% 60 CH ₄ , % 40 CO ₂
Gaz saflık oranları	CH ₄ : % 99,6 – CO ₂ : % 99,995
Yoğunluk (kg/m ³)	1,2208
Alt Isıl değer (kJ/kg)	17659
Stokiyometrik oran	6,04/1
Teorik Metan sayısı	140

Biyogaz karışımının regüle edilebilmesi adına özel karışım gaz tüpleri temin edilerek basınç 200 Bar'dan regülatör ile öncelikle, 300mBar'a sonrasında da 50mBar'a düşürülmüştür.

2.1.11 Kullanılan motor yağı

Yağlama için tüketilen enerjideki artışa rağmen motorda oluşabilecek aşınmaların önüne geçilerek motorun kullanım ömrünü uzatmak için yüksek viskoziteli yağ (SAE40) kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan yağın özellikleri Çizelge 2.11'de verilmiştir.

Çizelge 2.11 Numaralı yağ numunesine ait özellikler.

Özellik	Değer
Viskozite Derecesi	40
Kinematik viskozite @ 40 °C mm ² /s, ASTM D445	118
Kinematik viskozite @ 100 °C mm ² /s, ASTM D445	13.5
Yoğunluk @ 15 °C, kg/l, ASTM D4052	0,87
Parlama noktası (Cleveland açık kap metodu), °C, ASTM D92	246
Akma noktası, °C, ISO 3016	-24
Toplam bazı sayısı, mgKOH/g, ASTM D 2896	4,5
Sülfatlanmış kül, % wt, ISO 3987	0,5

2.2 Metot

2.2.1 Kavramsal tasarımın oluşturulması

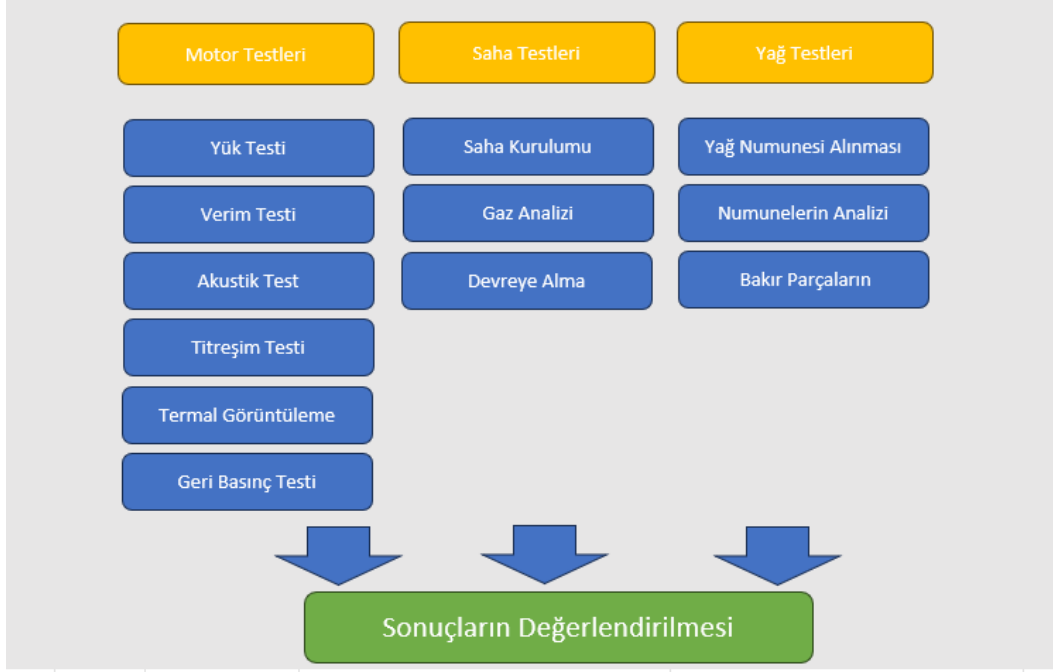
Motorun uygulama sahası öncelikli olarak Türkiye olacağı için 50Hz şebeke frekansı baz alınmıştır, buna bağlı olarak motorun çalışma devri 1500 olarak kabul edilmiştir. Motor test şartlarında ISO 3046-1 baz alınmıştır. Fakir yanma şartları ve %60 CH₄, %40 CO₂ gaz içeriğinde motordan 48kWm çıkış gücü alınması hedeflenmiştir. Ek maliyet yaratmaması adına, yanma verimini etkileyeceği bilinmesine rağmen yeni silindir kapağı tasarımı bu çalışmada düşünülmemiştir, enjektör deliklerinin yerine, buji montajı için kanal tasarlanması, bunların kapak içerisindeki galerileri etkilememesi ve sızıntı problemi yaratmaması amaçlanmıştır. Egzoz ve emme manifoldları dizel motor ile ortak kullanılmış, turbo ise yeni yakıt ve yanma koşullarına göre yeniden seçilmiştir. Külbütör kapakları enjektör girişlerinin külbütör kapağı dışında bulunması sebebiyle değiştirilmemiştir. Sıkıştırma oranının ve yanma odasının değişimi yapılarak, emiş, yağlama, soğutma sistemleri gözden geçirilmiş, bakır alaşımı ihtiva eden yatak vb. parçaların korozyona dayanıklılığı yüksek muadilleri ile değiştirilmesi değerlendirilmiştir.

2.2.2 Test ve geliştirme planı hazırlanması

Tez konusu motor için güç, emisyon, kullanılacak dizel motor altyapısı, değişecek parçalar tayin edilmiştir. Motorun jeneratör haline getirilmesinden sonra testi esnasında kontrol edilecek parametreler ve limit değerleri belirlenmiştir, bu değerler aşağıda listelenmiştir.

- Soğutma sistemi için yağ ve su giriş çıkış değerleri, basınçları ve debisi
- Egzoz manifoldu için maksimum manifold sıcaklık değeri
- Turboşarj için türbin giriş sıcaklık değeri ve geri basınç değeri
- Emme manifoldu maksimum sıcaklık değeri ile intercooler giriş sıcaklık değeri ve debisi

Performans değerlendirmesi için yapılan testler motor, saha ve yağ testleri olarak u ana gruba ayrılmaktadır. Her grup için yapılan testler detaylı olarak Şekil 2.10’da sunulmuştur.



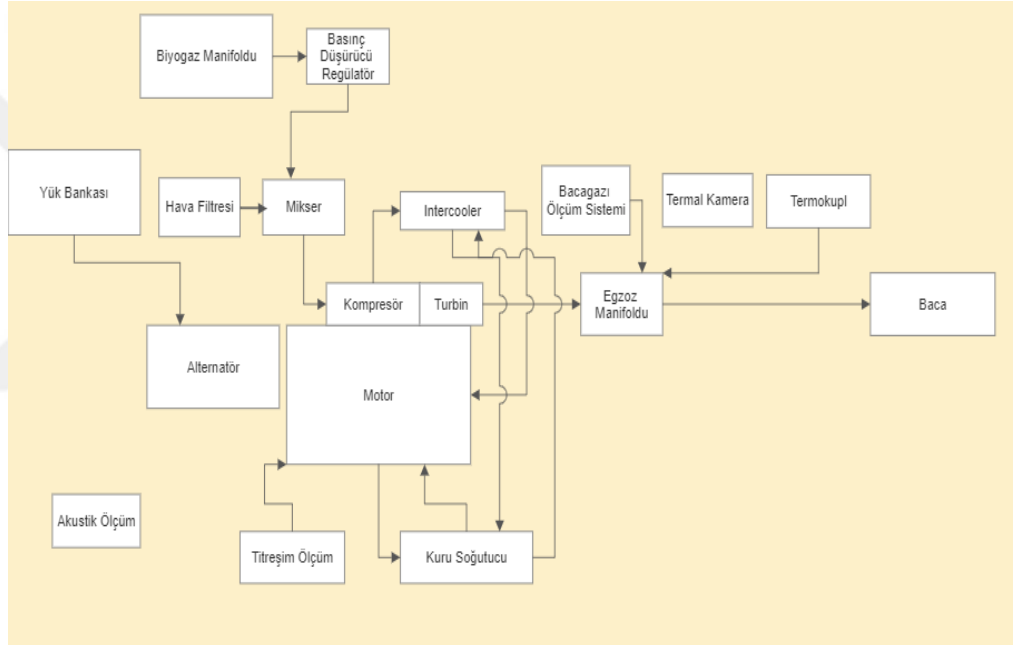
Şekil 2.10 çalışmanın kapsam ve içeriği.

2.2.3 Deney düzeneği

Deney düzeneğinin, Şematik gösterimi ve deney ortamı Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’te verilmiştir. Yapılan testler esnasında motor termik veriminin ölçülebilmesi adına yakıt tüketimi, emisyon Şartlarına uyumun kontrol edilebilmesi adına emisyon testleri, motor parçalarındaki aşınmaları tayin edebilmek adına yağ analiz testleri yapılmıştır.



Şekil 2.11 Deney ortamı.



Şekil 2.12 Deney düzeneğinin şematik görüntüsü.

2.2.4 Motor tasarımı

Tez kapsamında 4 silindirli bir içten yanmalı biyogaz yakıtlı motor geliştirilmiştir. Motor Otto çevrimi ile çalışmaktadır. Kullanılabilir ısı miktarının artırılması hedeflenerek motorda turboşarjlı besleme yapılmıştır ve şarj havası çift kademeli intercooler vasıtasıyla soğutulmaktadır.

Motorda hava yakıt karışımının emmeden verilmesi için ventüri tip mikser kullanılmıştır. Miksere girecek havanın miktarı, servo tip bir motor tarafından

kontrol edilen bir akış vanası sayesinde ayarlanarak her güç bandında hava yakıt karışımı kontrol altında tutulmuştur. Motor tasarımında fakir yanma koşulları baz alınmıştır. Bu şekilde tasarımın temelinde dizel motor kullanılmasına rağmen, yanma sıcaklıklarının dizel motor yanma seviyelerinde kalacağı öngörülmüş ve ortak parça kullanımının artırılması hedeflenmiştir.

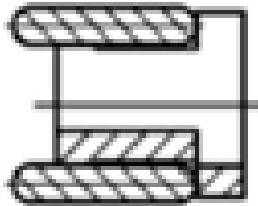
2.2.5 Turboşarj seçimi

Biyogaz yakıtlı motorlarda gazın içeriğindeki CO₂ sebebiyle oluşan hacim kaybının motorda oluşturduğu güç kaybının tolere edilmesi açısından en önemli komponentlerden birisi turboşarjdır. Bu sayede motor, aşırı besleme sağlayarak yanma odası içerisinde hedeflenen miktarda hava yakıt karışımı bulunmasını sağlayabilmektedir. Seçilecek turboşarjın sadece kartuşunun su soğutmalı olması, olası su kaçağı problemlerinin yaşanmaması adına tercih sebebi olmuştur. Seçilecek turboşarj tek kademe sarmallı ve sabit devir, değişken yük altında çalışacağı için yüzen tiptir. Seçilecek turboşarj sonrasında egzoz manifoldu bağlantı adaptör parçası, çıkış dirseği ve emiş bağlantı ekipmanları tasarlanarak bağlanmıştır.

2.2.6 Piston seçimi

Tasarlanan biyogaz yakıtlı, ventüri tip mikser ile hava yakıt karışımını sağlayacak olan motorun sıkıştırma oranı 13:1 olarak belirlenmiştir. Detay tasarımlar piston tedarikçisi tarafından yapılarak pistonun çelik alaşımdan üretilmesine karar verilmiştir.

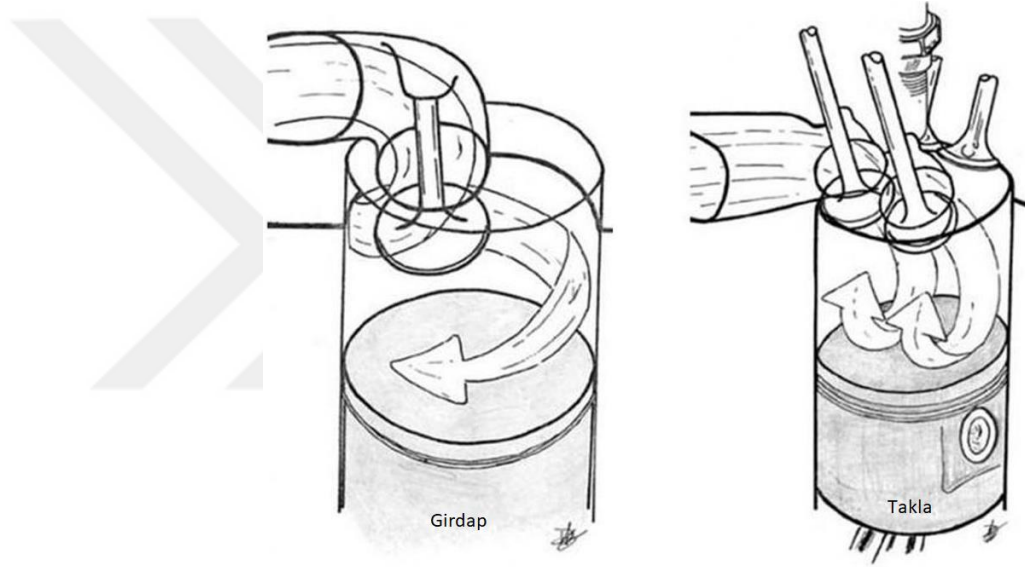
Segman ve kaplama seçimleri, yağ tüketiminin 0,25 gr/kWh seviyesi altında kalması hedeflenerek yapılmıştır. Seçilen yağ segmanının kesit görüntüsü Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Üç Parçalı Yağ Segmanı Kesiti

Ön karışimli gaz yakıtlı motorlarda en önemli tasarım parçalarından bir tanesi pistondur. Yanmanın başlayacağı zamana kadar türbülans ile karışımın homojen şekilde tutulması ve yanma başlangıcı öncesinde de akışın yavaşlatılması ile kontrollü bir şekilde yanma sağlanabilmektedir. Dizel motorlar ile ön karışimli gaz motorlarının girdap ve takla oranları birbirinden farklılaşmaktadır. Dizel motora ait emme portuna sahip bir motorda takla performansının artırılması piston tasarımı ile sağlanabilmektedir.

Yanma odasında girdap ve takla oluşumu ile ilgili şematik gösterim Şekil 2.14’de görülmektedir.



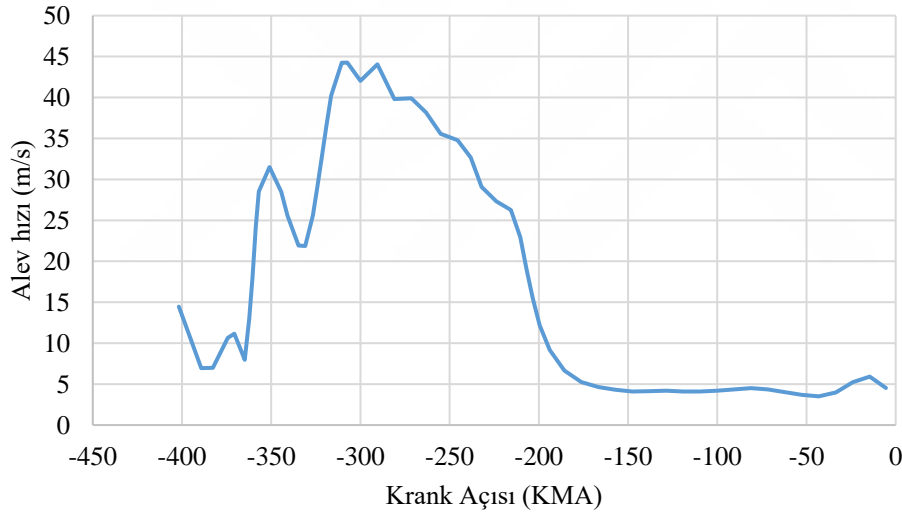
Şekil 2.14 Yanma odası içerisinde girdap ve takla oluşumunun gösterimi (Anonim 2)

Krank açısına bağlı olarak değişen volümetrik kinetik enerji değerleri Şekil 2.15’te görülmektedir.



Şekil 2.15 Volumetrik kinetik enerji grafiği

Yanma odası içindeki hız dağılımı Şekil 2.16'de görülmektedir.



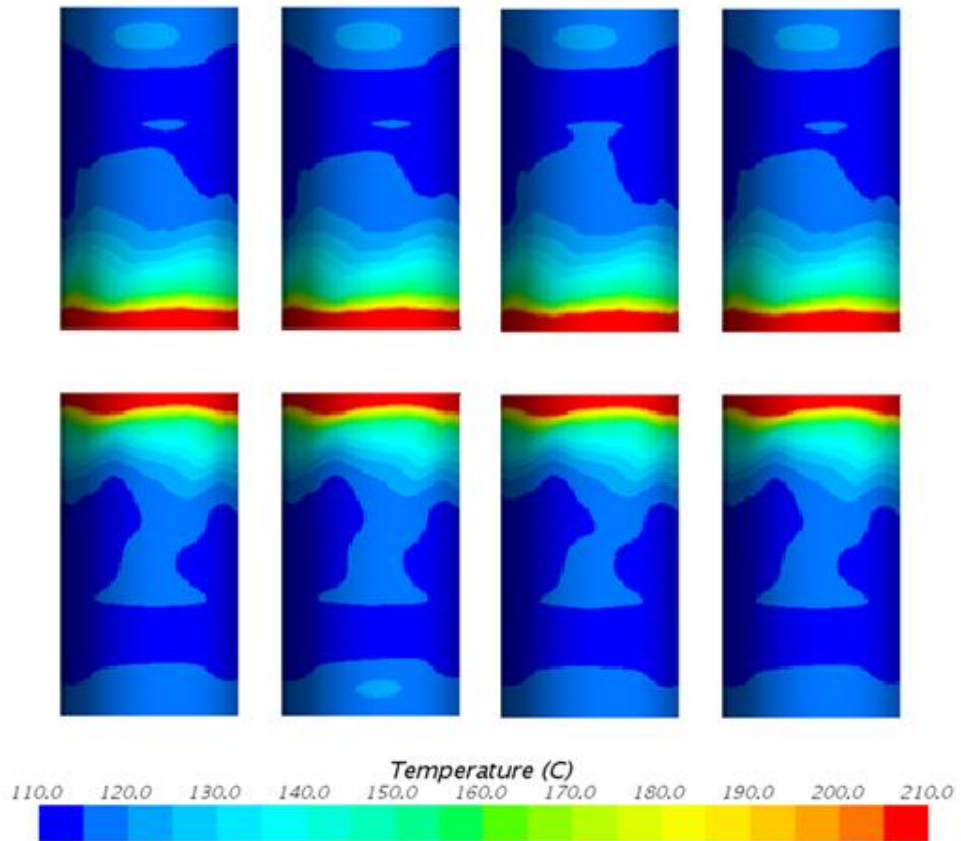
Şekil 2.16 Yanma odası içinde hız grafiği

Krank açısına bağlı olarak yanma odası içerisindeki türbülans ile hız değerlerinin değerlendirilmesi için yapılan analiz sonuçları sonuçlarına göre en iyi karışımı ve yanmayı sağlayabileceği değerlendirilen piston tasarımını seçilmiştir.

2.2.7 Silindir kapağı tasarımı

Kullanılacak olan silindir kapağı halihazırda dizel bir motora aittir ve yeni bir silindir kapağı tasarımı ve üretimi yerine aynı ürün üzerinden hızlı ve ekonomik bir ürüne gidilmesi hedeflenmiştir. Silindir kapağının uzun ömürlü şekilde kullanılabilmesi için yanma sonucunda ortaya çıkan ısı yüküne dayanabileceği

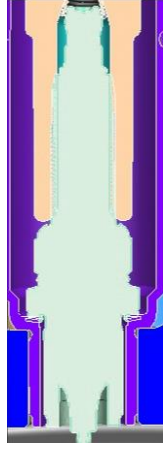
kontrol edilmelidir. Bu sebeple yanma analizi sonucunda elde edilen ısı yüklerinin yanma odasındaki yüzeylere eşleştirilmesi ve ısınan parçaların akışkanlar ile soğutulması modellenerek simülasyonunun yapılması gereklidir. Buna istinaden CFD analizleri ile kapağın soğutma performansı kontrol edilmiştir. Silindir gömlek yüzeylerindeki sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için yapılan simülasyonda elde edilen değerler Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17 Silindir gömlek yüzeylerindeki ısı değerlerinin simülasyonu.

Mekanik olarak ateşleme bujilerinin yerleştirilmesinin planlandığı alanlar ile enjektör pozisyonları eşleştirilmiş ve buna göre M14 ölçüsündeki buji için enjektör deliğinin büyütülmesi amacıyla silindir kapağının çizimlerinin incelenmesi gerekmiştir.

Enjektör gömleğinde yapılacak olan çap değişimi için tasarım çalışmaları yapılmıştır. Oring kanallarının çapları uygun hale getirilmiştir. Kullanılacak buji kovanının kesiti Şekil 2.18’de sunulmuştur.



Şekil 2.18 Buji Kovanı Kesiti

2.2.8 Yakıt sistemi tasarımı

Dizel motorda kullanılan yakıt sistemlerinin çıkarılması ve gaz motorunda kullanılacak olan mikser (Şekil 2.19) ve ateşleme bobini ile teflon buji kablosu uzatmalarının yerleşim ve bağlantı tasarım ve analizleri yapılmıştır.



Şekil 2.19 Gaz mikseri

Tasarlanan motorun fakir yanmalı bir gaz motoru olması sebebiyle bujinin ateşleme yapabilmesi için gerekli olan minimum ateşleme enerjisi seviyesi stokiyometrik bir motora göre çok daha yüksektir. Bu yüzden piyasada otomotivde kullanılan ateşleme bobinlerinin kullanılabilmesi mümkün olmamıştır.

Endüstriyel tip 300mJ ateşleme enerjisine sahip bobinler (Şekil 2.20) kullanılmıştır.



Şekil 2.20 Ateşleme bobini

Kullanılan bujilerin 35kV değerine kadar ateşleme gerilimine çıkabiliyor olması sebebiyle, 4mm et kalınlığına sahip teflon uzatma parçalarının (Şekil 2.21) kullanılması gerekmiştir, aksi halde bujiye gönderilen yüksek gerilimin gövdeye atlama yapması ve çevrimde ateşlemenin sağlanamaması söz konusu olabilmektedir.



Şekil 2.21 Teflon uzatma parçası

Gaz motorunda venturi tüp mikser kullanılmıştır, bu mikserler ventüri etkisi ile çalıştığından dolayı gaz emişini motorun emme zamanında hava emiş esnasında oluşturduğu vakum ile sağlamaktadır, bu yüzden ebatlaması ve akış hesabının doğru yapılması motorun tüm yük bantlarında sağlıklı hava yakıt karışımını sağlaması adına önemlidir. Bobinlerin motor silindir kapağı üzerine yapılacak olan braket ayakları üzerine takılması, emiş mikserinin ise yine motor bloğu üzerine oluşturulacak braket üzerine sabitlenmesi hedeflenmiştir.

2.2.9 Gaz kelebeği

Gaz motorunda ön karışım yapılması sebebiyle, yanma odası içine girecek yakıt hava karışımının kontrolü, motorun jeneratör uygulaması için öneme haiz olan devir kontrolünün gaz kelebeği ile yapılmasını gerekli kılmaktadır. Gaz kelebeği

(Şekil 2.22) pozisyonu governör kartının müdahalesine bağlı olarak değişerek motor devrinin 1500 devir/dakika seviyesinde kalmasını sağlamakta ve gaz kelebeğinin ebatlaması hava akış sisteminin çapına, tork seviyesi ile emişte oluşan vakum seviyesine göre değişmektedir.



Şekil 2.22 Gaz kelebeği.

Gaz kelebeği PWM sinyali ile kontrol edilmekte olup, pozisyon bilgisi de analog sinyal vasıtasıyla alınarak hassas pozisyon kontrolü için geri bildirim olarak kullanılmaktadır.

2.2.10 Yağlama sistemi

Motorun yağlama sistemi yeni yapılacak ekipman değişikliklerine göre yeniden değerlendirilmiştir, kullanılacak yeni turboşarjın yağ basınç ve debi gereksinimi dikkate alınmış ve yeni yağlama boruları hazırlanmıştır. Bunun dışında motorda SAE40 yağ kullanılacak olması sebebiyle, yağ pompasının dişlerinin SAE40 yağ viskozitesine dayanımı değerlendirilmiş ve sorun görülmemiştir. SAE40 yağ kullanımı sonucunda oluşacak yağ basıncı yükselmesine istinaden conta basma değerleri dikkate alınarak, sistem yağ kaçaqlarına karşı kontrol edilmiştir.

2.2.11 Motor kontrol sisteminin tasarımı

Motorun performans parametrelerinin sağlanması adına vuru kontrol ünitesi, ateşleme kontrol ünitesi, AFR kontrol ünitesi, hız kontrol ünitesi ekipmanlarının birbiri ve jeneratör kontrol ünitesiyle haberleşmesinin sağlanması gerekmektedir (Şekil 2.23). Vuru kontrol ünitesi ile silindirlerde kontrolsüz alev oluşması durumunun önüne geçilmesi, yanlış zamanda yanma sebebiyle motora verilebilecek zararın önlenmesi sağlanmaktadır.

Ateşleme kontrol ünitesi ile birlikte her silindirin ateşleme zamanı ve ateşleme gerilimleri kontrol edilmektedir. Silindirler arasında ateşleme zamanında ayarlama yapılmasının gerekmesi durumunda avans veya rötar verilmektedir. Eğer ateşlemenin sağlanamadığı silindir var ise bunun da izlenmesi sağlanmaktadır.

AFR kontrol ünitesi, motorun yük seviyesine göre mikser sisteminin açıklığını kontrol ederek farklı yük seviyesinde de hava yakıt karışımının ayarlanması sağlayarak emisyon seviyesinin sabit bir seviyede tutulması için ayarlamaları gerçekleştirmektedir. Bu durum motorun farklı yük seviyelerinde hem hava yakıt karışımının aşırı fakir seviyeye giderek ateşleyememe durumundan uzak kalmasını, hem de zengin seviyeye giderek vuruntulu çalışmamasını sağlamaktadır.

Hız kontrol ünitesi kartı motorun hızını pikap sensörü ile okumakta ve buna bağlı olarak aldığı sinyali işleyerek motor hız seviyesindeki değişiklikleri algılamaktadır, bu sinyalleri PID kontrollü olarak işleyerek hava yakıt karışımının motor silindirlerine kontrollü aktarımını sağlamaktadır, motor devir seviyesinde düşme veya yükselmeye bağlı olarak gaz kelebeğini kontrol ederek motor hız seviyesi 1500 devir/dakika olarak sabit tutulmaktadır.



Şekil 2.23 Motor Kontrol Sistemi.

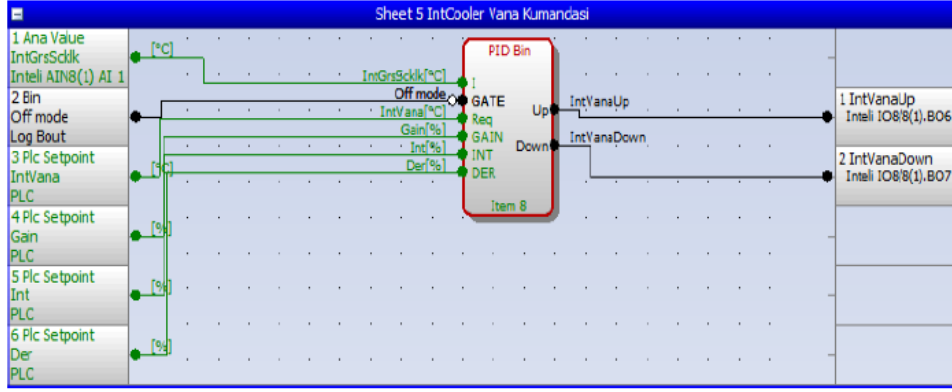
Motorun soğutma ve diğer kontrol sistemlerinin eksiksiz çalışmasının sağlanabilmesi adına bir kontrol sisteminin tasarlanması gerekmektedir. Kontrol sisteminde motorun ceket suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, basınç değerleri, egzoz gazı sıcaklığı, yağ basıncı ve sıcaklığı gibi parametreler kontrol edilmektedir. Buna göre üç yollu vana ekipmanlarının PID kontrolü, gaz hattı ekipmanlarının açma ve kapama fonksiyonları ve pompa, radyatör gibi ekipmanların kontrol senaryoları çalıştırılabilmektedir.

Motor üzerindeki basınç ve sıcaklık değerleri sensör modülleri, egzoz hattı ve egzoz manifoldu üzerindeki sıcaklık değerleri ise termokupl modülleri ile okunmuştur. Verilen değerlere ilişkin fonksiyonlar dijital giriş ve çıkış modülleri ile işlenerek sinyal üretilmesi ve iletilmesi sağlanarak ekipmanları kontrol altında tutacak senaryolar çalıştırılmıştır (Şekil 2.24).



Şekil 2.24 Kojen-trijen proses otomasyonu.

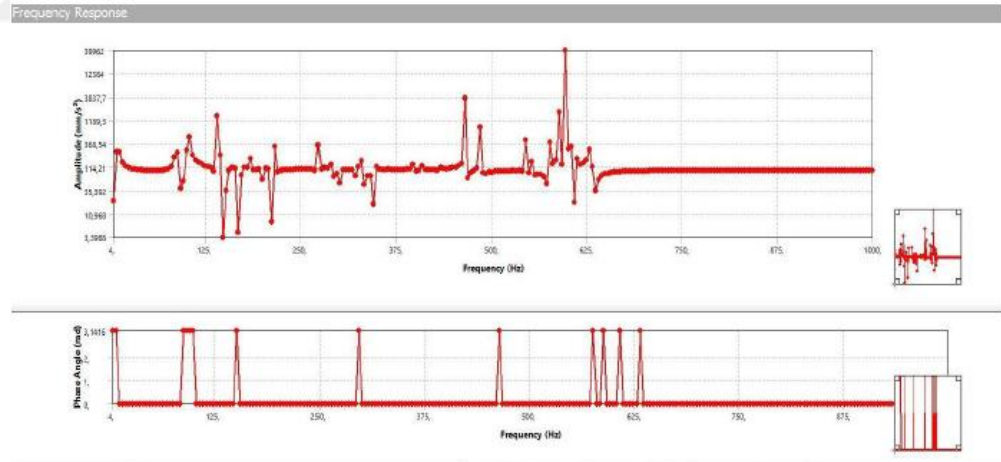
Sensörler ile okunan veriler ve PLC üzerinden ayarlanan değerlere göre çalıştırılan PID kontrolün akım şeması Şekil 2.25'te verilmiştir.



Şekil 2.25 intercooler ile radyatör arasındaki üç yönlü vana kontrol algoritması.

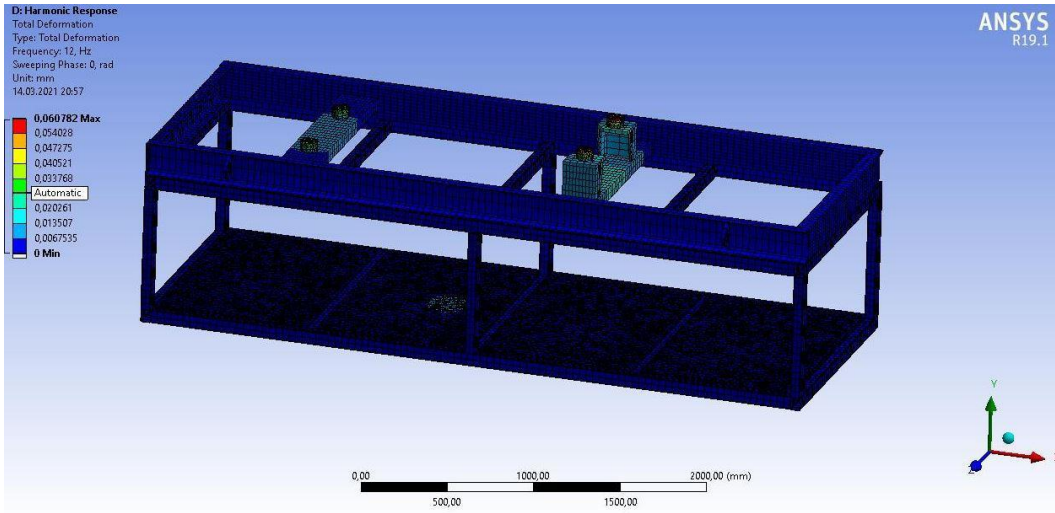
2.2.12 Şasi harmonik analizleri

Tasarlanan motorun dönüş hızı 1500 devir/dakika olduğundan dolayı doğal frekansı 12,5 Hz ve katlarında meydana gelebilecek rezonanslara karşı bağlantı ekipmanları ve şasinin ekipmanlarının buna göre incelenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak öncelikle şasinin harmonik analizi (Şekil 2.26) yapılmış ve olası rezonans risklerine karşı kontrol edilmiştir.

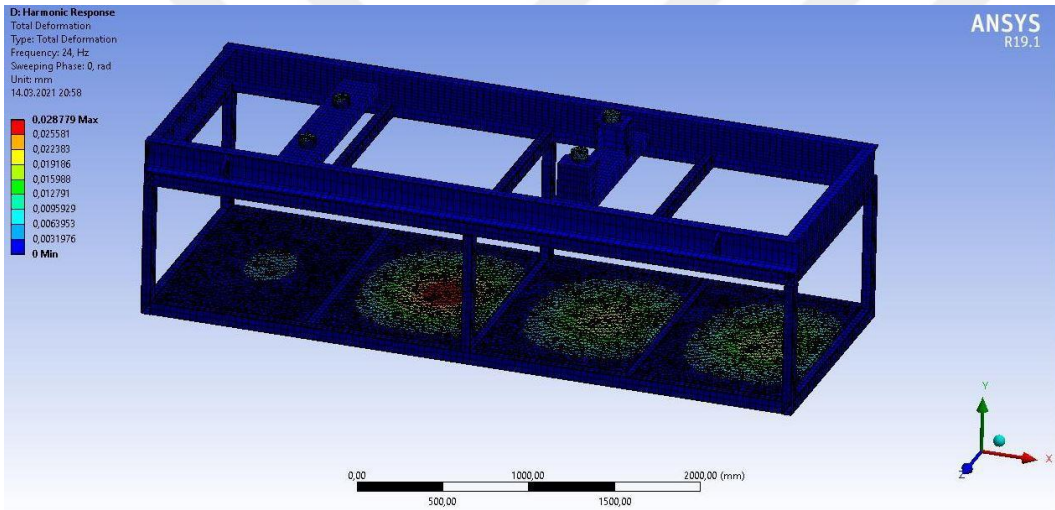


Şekil 2.26 Şasi harmonik analizi.

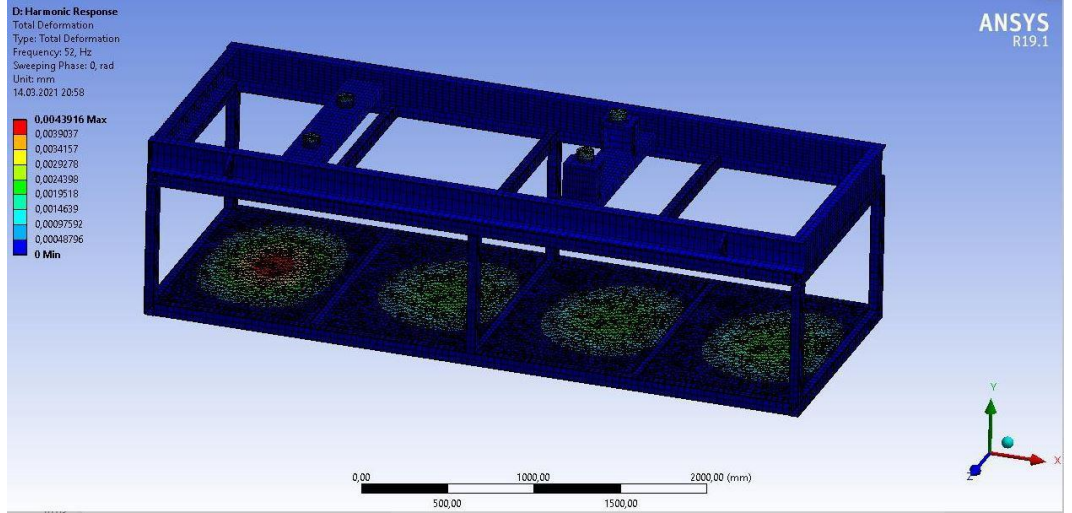
Farklı frekans değerleri için yapılan şasi harmonik analizleri için örnek görüntüler Şekil 2.27-Şekil 2.28-Şekil 2.29-Şekil 2.30'da verilmiştir.



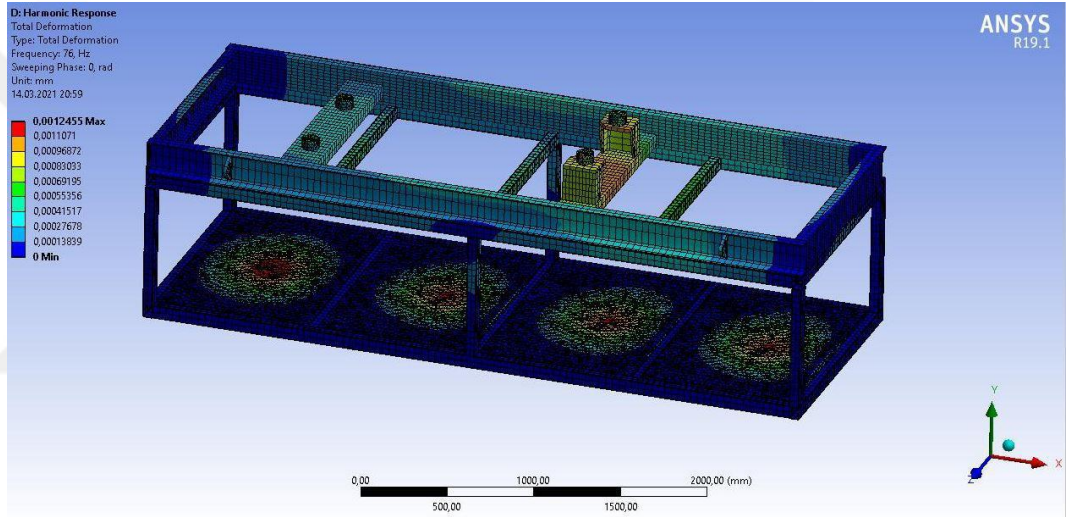
Şekil 2.27 Şasi harmonik analizi 12.5 Hz.



Şekil 2.28 Şasi harmonik analizi 25 Hz.



Şekil 2.29 Şasi harmonik analizi 50 Hz.



Şekil 2.30 Şasi Harmonik analizi 75 Hz.

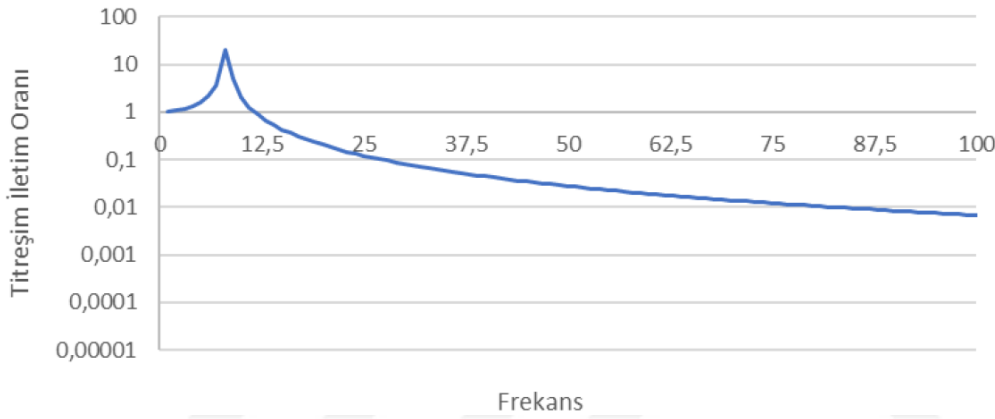
Gaz motorunun çalışma esnasında ortaya koyacağı dinamik yüklerin iletiminin engellemesi ve buna istinaden üzerinde taşıdığı ekipmanların titreşimden etkilenmesinin minimuma indirgenmesi için kauçuk yapıda izolatörlerin kullanılması gereksinimi vardır.

$$Tr = \frac{F}{Fo} = \left| \frac{1}{1 - u^2} \right| \quad (0.1)$$

$$u = \frac{f}{fn} \quad (0.2)$$

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Kx1000}{m}} \quad (0.3)$$

Titreşim iletim oranı olan T_r değeri ana titreşim kaynağı olan motorun doğal frekansına bağlıdır. Motorun devir sayısına bağlı olan titreşimleri sönmölemek adına 25 Hz üzerinde izolasyon yapmak hedeflenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda titreşim izolasyon değerleri Şekil 2.31’de gösterilmiştir.



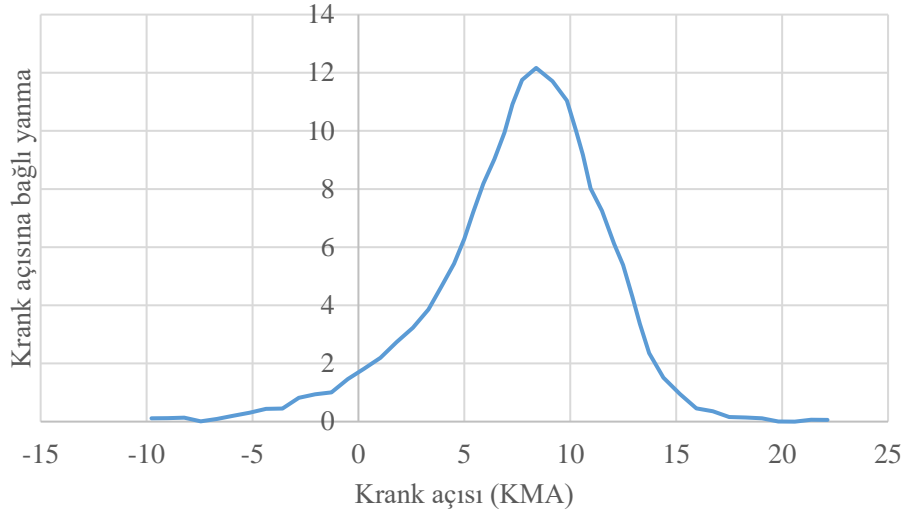
Şekil 2.31 Titreşim iletim grafiği.

2.2.13 Motor yanma verileri

Biyogaz yakıtlı kojenerasyon motorunun geliştirilmesi sürecinde %60 CH₄, %40 CO₂ içeriğine sahip biyogaz karışımının dikkate alındığı sistemin analiz için modeli kurulmuş ve sonuçları irdelenmiştir. 50Hz şebeke frekansında çalışılacağından dolayı motor 1500 devir/dakika olarak çalışacak şekilde kabul edilmiş ve ISO3046 standardında belirtilen saha şartları dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda motorun termik verim değerinin %35’in üzerinde olması hedeflenmiştir. Bu hedefe erişmek için temel olarak yüksek sıkıştırma oranı ve kompresyon verimine sahip bir turboşarj seçimi ile iyi bir yanma odası tasarımı yapılması gerekmektedir. Bu sistemi oluşturacak ekipmanların, olabildiğince özel imalat olmadan, hali hazırda standart kullanılan ekipmanlardan seçilmeye çalışılması ürün maliyeti açısından avantaj sağlarken, diğer yandan verim konusunda sınırlayıcı olmaktadır.

Yapılacak çalışmalar çerçevesinde motorun yanma modelinin kurulması, akış ve ısı analizlerinin yapılması, temin edilecek turboşarj haritalarının sisteme entegrasyonu ve sonucunda nihai modelin oluşturulması hedeflenmiştir.

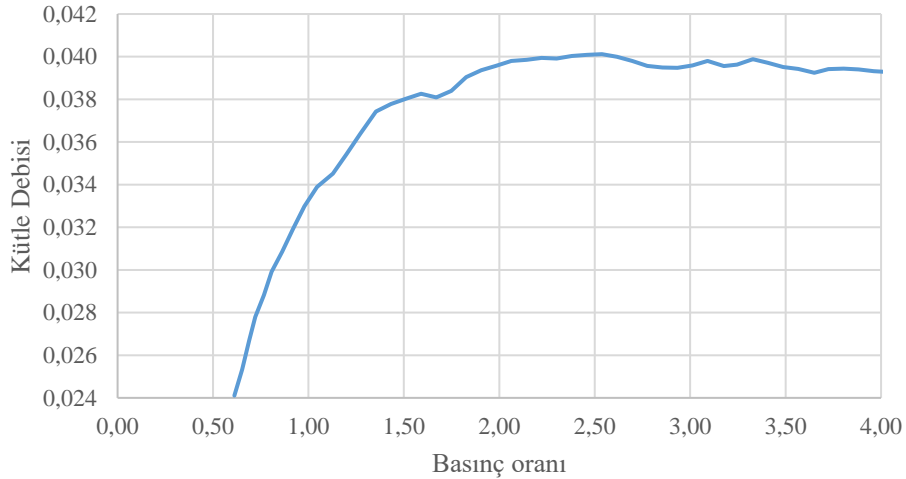
Krank açısına bağlı olarak elde edilen yanma oranı grafiği, Şekil 2.32’de verilmiştir.



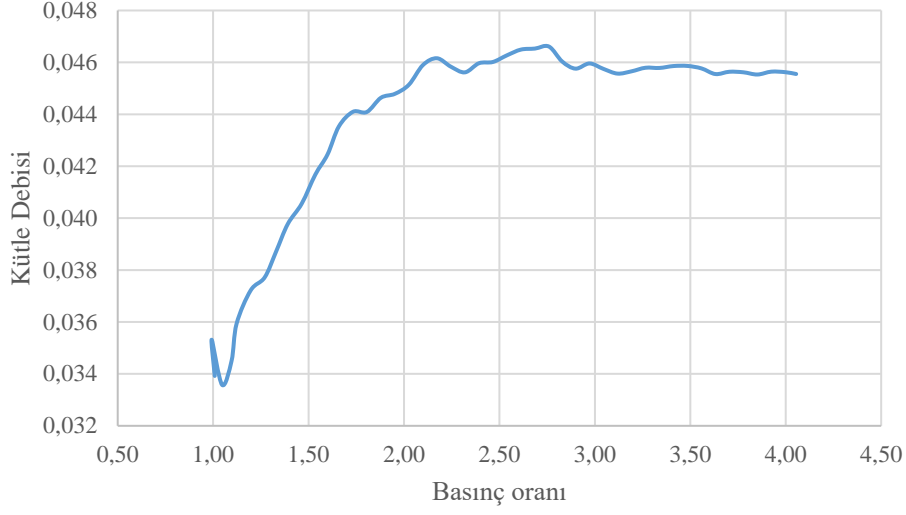
Şekil 2.32 Krank açısına bağlı yanma oranı grafiği.

2.2.14 Türbin ve kompresör haritaları

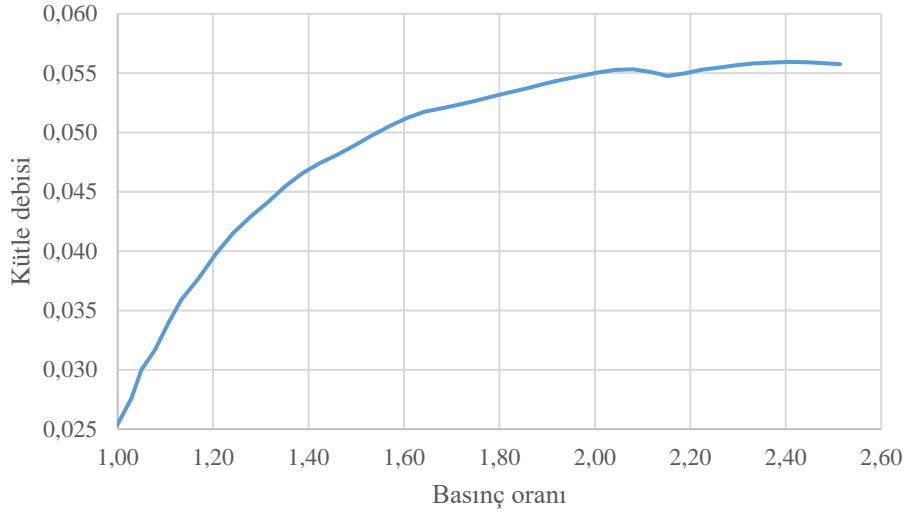
Geliştirilen motorda kullanılmak üzere 3 adet farklı türbin haritası ile model hazırlanmıştır (Şekil 2.33). Bu modeller fakir karışimli biyogaz yakıtlı yanma modellerinin çalıştırılmasında veri olarak kullanılmıştır. Bu haritaları oluşturan veriler modele girilerek sonuçların ortaya konulmasında kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.33 Piyasadan temin edilen üç farklı turboşarj ait türbin haritaları.

Yapılan analizler sonucunda üç farklı turboşarj haritasına göre yanma analizlerinin sonucunda motorlardan elde edilmesi beklenen verim değerleri farklı ateşleme zamanlarına göre verilmiştir (Çizelge 2.12).

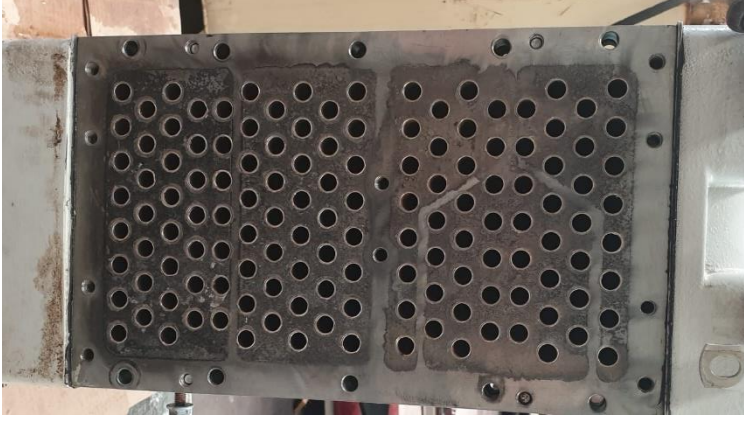
Çizelge 2.12 Biyogazlı fakir yanma.

Biyogazlı Fakir Yanma								
Turboşarj 1			Turboşarj 2			Turboşarj 3		
Çıkış Gücü	Verim	Ateşleme Açısı (BTDC)	Çıkış Gücü	Verim	Ateşleme Açısı (BTDC)	Çıkış Gücü	Verim	Ateşleme Açısı (BTDC)
kW	%		kW	%		kW	%	
48	34,7	22	48	34,3	22	48	33,4	22
48	35,1	20	48	34,1	20	48	33,5	20
48	35,2	18	48	34,2	18	48	33,7	18
48	35,2	16	48	33,9	16	48	33,9	16
48	34,8	14	48	33,7	14	48	33,7	14
48	34,5	12	48	33,4	12	48	33,3	12
48	34,2	10	48	33,2	10	48	33,1	10
48	33,9	8	48	33,1	8	48	32,8	8

Alınan sonuçlara göre, Turboşarj 1 isimli turboşarjın kullanılması durumunda en tam yükte % 35,2 termik verim değerini 500 mg/m³ NO_x emisyonu limitinde yakaladığı ölçülmüştür, buna sonuçlara istinaden, “Turboşarj 1” isimli turboşarjın kullanılmasına karar verilmiştir.

2.2.15 Motor soğutma sistemi tasarım

Motorun simülasyon çalışmaları sonrasında elde edilen ısı yük bilgileri sonucunda motorun ceket hattına vereceği ısı yükler hesaplanmıştır. Motordan ısının uzaklaştırılması ve ceket hattında istenen 6 derecelik yaklaşımın sağlanabilmesi adına ceket suyu pompası debisi ve basınç kaybı değerleri belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken ceket suyunda dolaşacak olan akışkanın % 50 oranında etilen glikol içerdiği göz önüne alınarak akışkanın C_p değeri dikkate alınmıştır. Tasarım esnasında, hava yakıt karışımının giriş-çıkış sıcaklıkları, basınçları ve istenen en yüksek basınç kayıp değeri ile HT ve LT hatlarındaki sıvı akışkan giriş çıkış basınçları ve basınç kayıp değerleri referans alınarak, sınır ölçü şartları dikkate alınmıştır. Bilgisayar destekli tasarım ve analiz işlemleri sonucunda ürün tasarımı oluşturulmuştur (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 Intercooler LT/HT görünümü.

Geliştirilen gaz motorunun kojenerasyon uygulamasında kullanılacak olması sebebiyle ceket suyu rejiminin 82-88°C aralığında olması gerekmektedir. Bunun sebebi, ceket ve intercoolerden elde edilen ısı enerjisi ek olarak hattın seri olarak egzoz eşanjörü üzerinden ek ısı yük almasıdır. Motor üzerinde hali hazırda bulunan termostat sıcaklığının da bu ısı rejime uygun olarak değiştirilmesi gerekecektir.

Intercooler tasarım çalışmaları iki kademeli olacak şekilde başlamıştır. Bunun sebebi, kojenerasyon sistemi tarafında kullanılabilir yüksek ısı veriminin artırılması ve motor tarafında manifold emiş sıcaklığının sıcak hava koşullarında da düşük tutularak motorda olası güç düşümünün en aza indirilmesidir.

2.2.16 Gaz yakıt düzeltme katsayısı (K)

Sıcaklık ve basınç değişimlerinden etkilenen gaz yakıtların hacim hesabının doğru ve hassas şekilde yapılabilmesi için sayaçtan okunan değerlerin hacimsel düzeltme katsayısı K ile düzeltilmesi gereklidir.

$$m_d = m_s \times K \quad (0.4)$$

$$K = (P/P_r) \times (T_r/T) \times (Z_r/Z) \quad (0.5)$$

$$P = P_a + P_s \quad (0.6)$$

m_d : Düzeltilmiş hacim (m^3)

m_s : Ölçülen hacim (m^3)

K : Düzeltme katsayısı

P : Ölçüm basıncı (bar)

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

P_r : Referans şartlardaki basınç (1,01325 bar)

P_s : Sayaç ölçüm basıncı (bar)

T_r : Referans sıcaklık değeri (288,15 K)

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

Z_r : Referans şartlardaki sıkıştırılabilirlik

Z : Ölçüm şartlarındaki sıkıştırılabilirlik

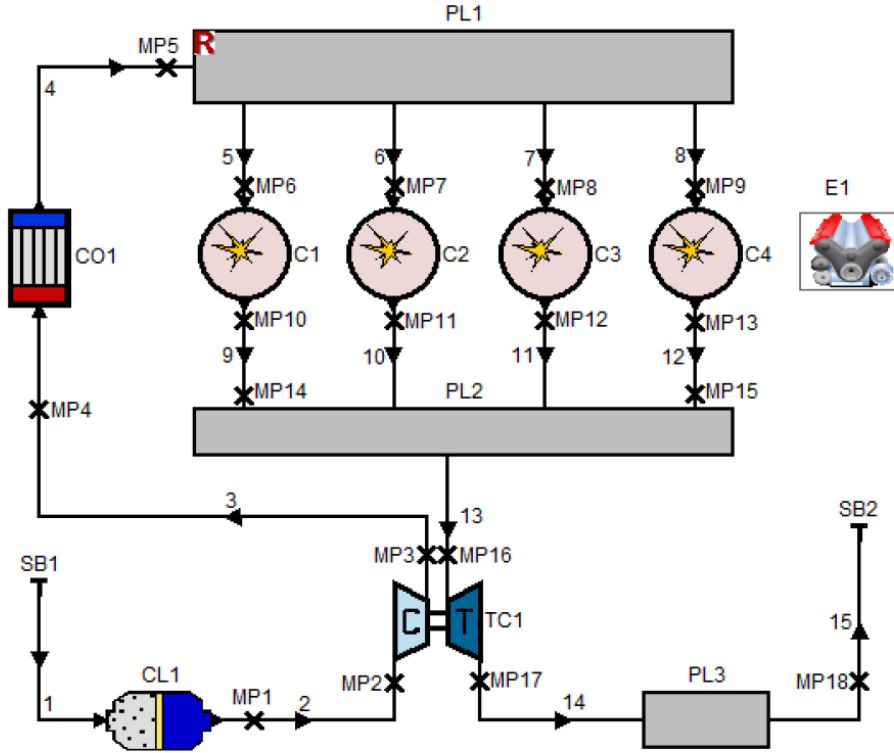
Z_r/Z (Sıkıştırılabilirlik oranı) : 1 olarak kabul edilmektedir.

Yukarıdaki veriler yardımıyla hesaplanan K katsayısı ile birlikte hacim değerleri düzeltilmiştir.

2.2.17 Motor modelinin geliştirilmesi

Matematiksel model, motor elemanlarının tasarımlarından yararlanılarak ve üç boyutlu tasarım ölçülerinden yararlanılarak oluşturulmuştur. Model olarak, quassi-static olarak tabir edilen, tek boyutlu akışkan ve boyutsuz olarak yanma analizleri yapan bir yazılımdan yararlanarak turboşarjlı ve intercoolerlı 4 silindirli bir motor tasarlanmıştır. Kütüphanedeki model verilerinden yararlanılarak 4

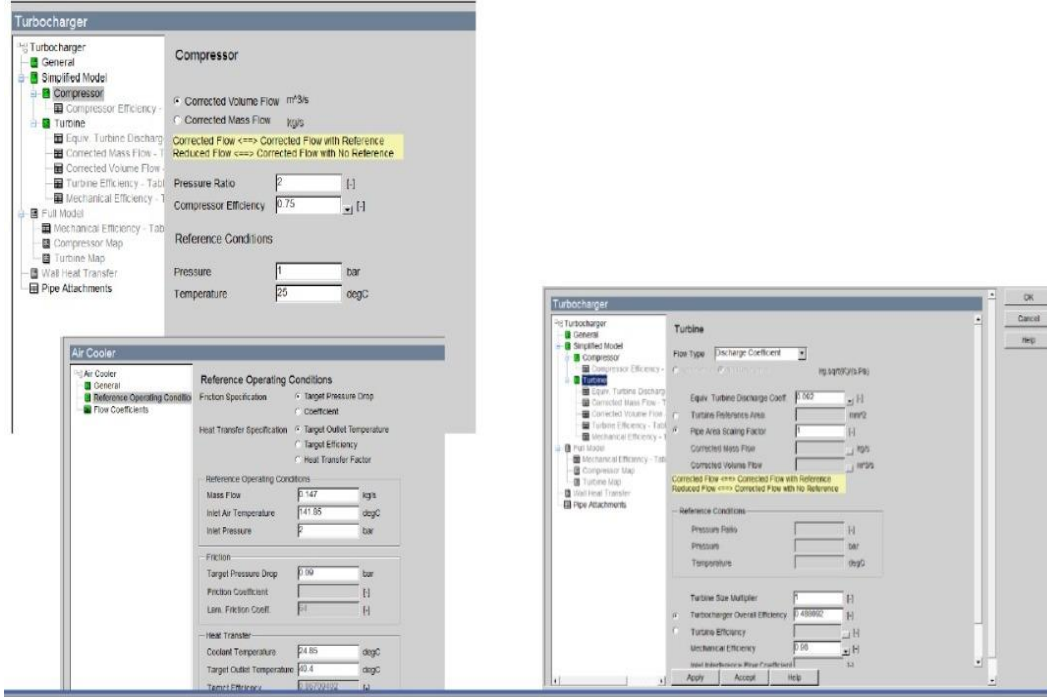
silindirli motor modeli oluşturulmuştur. Şekil 2.35'den de görüleceği üzere, turboşarjlı, intercooler sistemli bir motor modellenmiştir.



Şekil 2.35 Tasarlanan motor modeli.

Yazılıma, motor parçalarının boyutları ve ölçüleri girilmiştir. Zira, gönderilen biyogaz miktarı, hava boost basıncı, manifold boyutları, port ölçüleri, filtreler, silindir çapı, segman, ısı transfer yüzey alanları ölçeklendirilerek girilmiştir. Yine, krank ve biyel ölçüleri, blow-by miktarı vs. girilmiştir. Ayrıca, emme ve egzoz supaplarının avansları, geometrileri (kalkış açıklığı), hava kayıp katsayıları mevcut motor ölçülerinden, yazılım kütüphanesinden ve literatür verilerinden de yararlanılarak oluşturulmuştur.

Yazılıma, motor parçalarının boyutları ve ölçüleri girilmiştir. Zira, gönderilen biyogaz miktarı, hava boost basıncı, manifold boyutları, port ölçüleri, filtreler, silindir çapı, segman, ısı transfer yüzey alanları ölçeklendirilerek girilmiştir. Yine, krank ve biyel ölçüleri, blow-by miktarı vs. girilmiştir. Ayrıca, emme ve egzoz supaplarının avansları, geometrileri (kalkış açıklığı), hava kayıp katsayıları mevcut motor ölçülerinden, yazılım kütüphanesinden ve literatür verilerinden de yararlanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.37 Modellemede kullanılan boyut ve özellikler.

Yakıt miktarının modellenmesi

Gönderilen yakıt miktarının belirlenmesi için ventüri mikserin matematiksel modeli geliştirilerek, yazılım yardımıyla hava akışına bağlı gönderilen yakıt miktarı belirlenmiştir. Şekil 2.38’de, yazılım programı yardımıyla geliştirilen matematiksel modelin görüntüsü verilmiştir. Burada, gönderilen yakıt miktarının hesaplamasında Bernoulli denklemlerinden yararlanılmıştır.

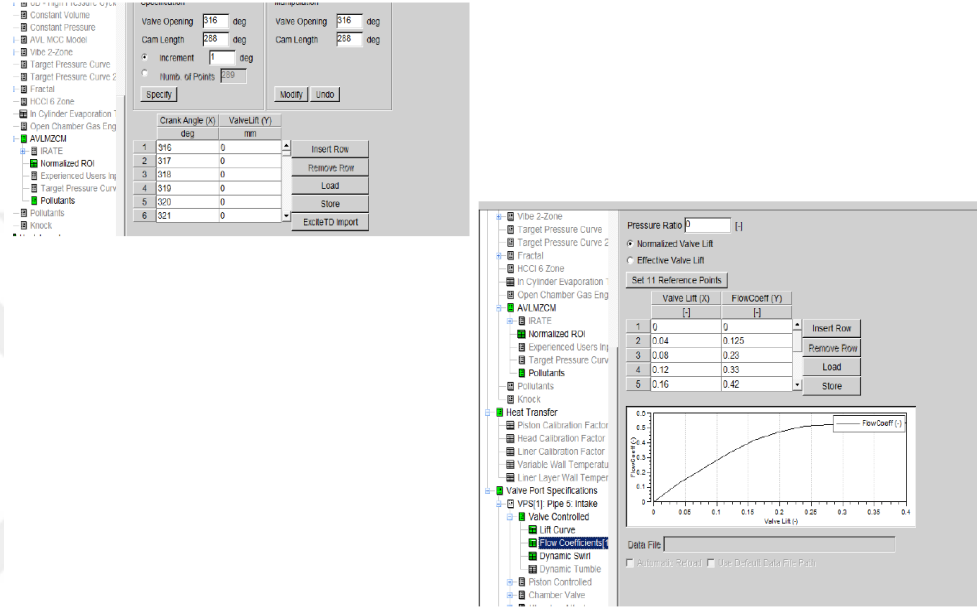
```

%engine_speed=2000;
injected_fuel_quantity=injected_fuel_quantity/1000000;
needle_hole_diam=0.157; %mm
hole_flow_area=(pi*needle_hole_diam^2)/4*6;
sample_rate=7200;
degca_needle=1:1:sample_rate;
if max(degca_needle)>720
needle_lift=0.3;
%rise_start_angle=525;
settle=needle_lift; % This is counter null variable
for i=1:1: numel(degca_needle)
if degca_needle(i)>=rise_start_angle && degca_needle(i)<=rise_end_angle
A_nozzle(i)=needle_lift_A(lift);
lift=lift+increment;
if isnan(A_nozzle(i))==1
A_nozzle(i)=hole_flow_area;
end
elseif degca_needle(i)>=rise_end_angle && degca_needle(i)<=fall_start_angle
A_nozzle(i)=hole_flow_area;
elseif degca_needle(i)>=fall_start_angle && degca_needle(i)<=fall_end_angle
A_nozzle(i)=needle_lift_A(settle);
settle=settle-decrement;
if isnan(A_nozzle(i))==1
A_nozzle(i)=hole_flow_area;
end
else
A_nozzle(i)=0;
end
end
end
end

```

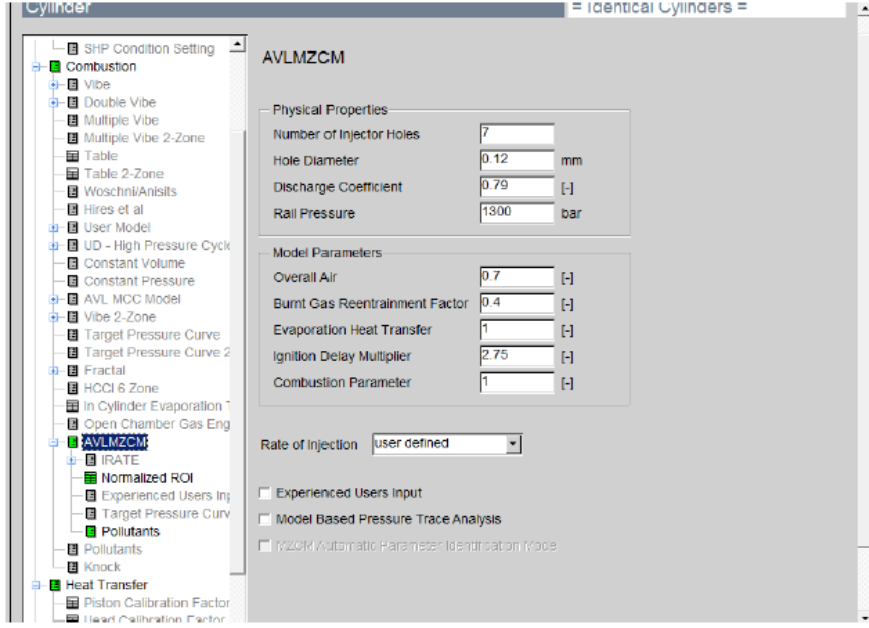
Şekil 2.38 Matematiksel model

Şekil 2.39’da, yazılıma tanımlanan emme ve egzoz supabı kalkma yükseklikleri ve akış kayıp katsayıları verilmiştir. Burada, emme ve egzoz avansı ile motorun üç boyutlu tasarımlarından yararlanılarak, kam miline bağlı olarak supap avansları ve supap açılma mesafeleri verilmiştir. Diğer taraftan, yazılımın kütüphanesinden de yararlanmak suretiyle, emme ve egzoz kanallarından geçen akışkan için akış kayıp katsayıları tanımlanmıştır.



Şekil 2.39 Yazılıma tanımlanan özellikler.

Yanma modeli olarak, Vibe 2 bölgesi yanma modeli seçilmiştir. Yanma modelinde, uygun Vibe parametreleri belirlenerek, gönderilen yakıt miktarı ve hava debisi de girilmek suretiyle yazılım çalıştırılmıştır. Ayrıca, ateşleme avansı da girilmiştir. Böylece, basınç eğrisi de göz önünde bulundurularak, en uygun Vibe parametreleri seçilebilmektedir. İki bölgesi model olduğu için emisyon verileri de elde edilebilmektedir. Şekil 2.40’da yazılımın yanma modelleri verilmiştir.



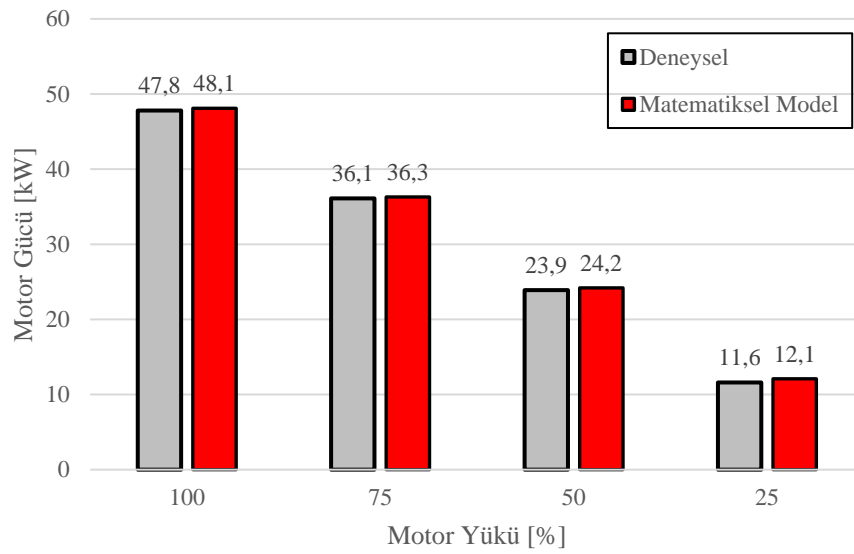
Şekil 2.40 Yanma modelleri

Yine, motor modelinde ısı transferi hesaplarında Woschni modelinden yararlanılmıştır. Yazılımın kendi kütüphanesinde Woschni modeli seçilerek, ısı transferi hesapları gerçekleştirilmiştir. Yüzey alanları, üç boyutlu çizim üzerinden hesaplanmıştır. Diğer taraftan, literatürden de yararlanılarak ısı transfer katsayıları için gerekli parametreler belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

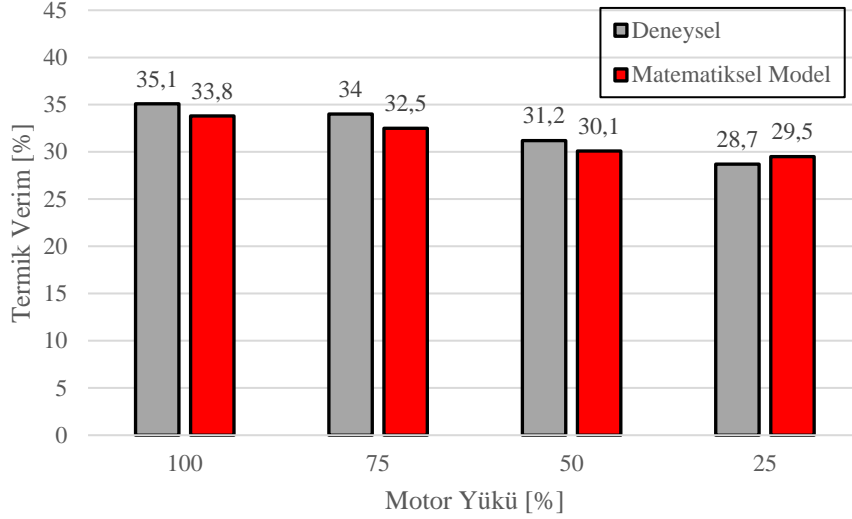
3.1 Matematiksel modelin doğrulaması

Deneysel sonuçlar ile matematiksel model ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1’de, farklı motor yüklerinde elde edilen motor gücü değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, motor yükünde kabul edilebilir oranda sapma meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Deneysel verilere göre matematiksel modeldeki farkın, %0,5 ila %4,3 arasında değiştiği belirlenmiştir.



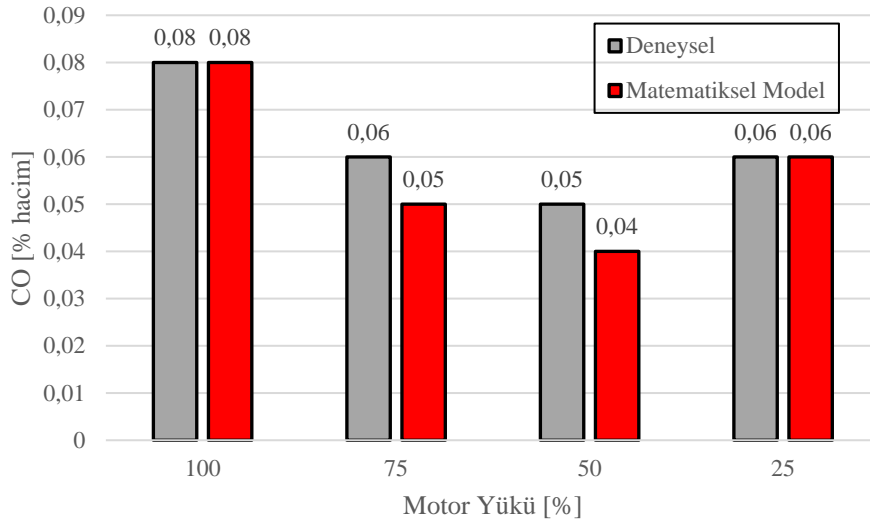
Şekil 3.1 Farklı motor yükleri için elde edilen motor gücü değerleri

Şekil 3.2’de, farklı yük kademelerinde termik verimin değişimi deneysel ve teorik model ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulardan, motorun termik veriminin % 4 ile % 6,6 arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. Yine, elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.2 Farklı motor yüklerinde elde edilen termik verim değerleri

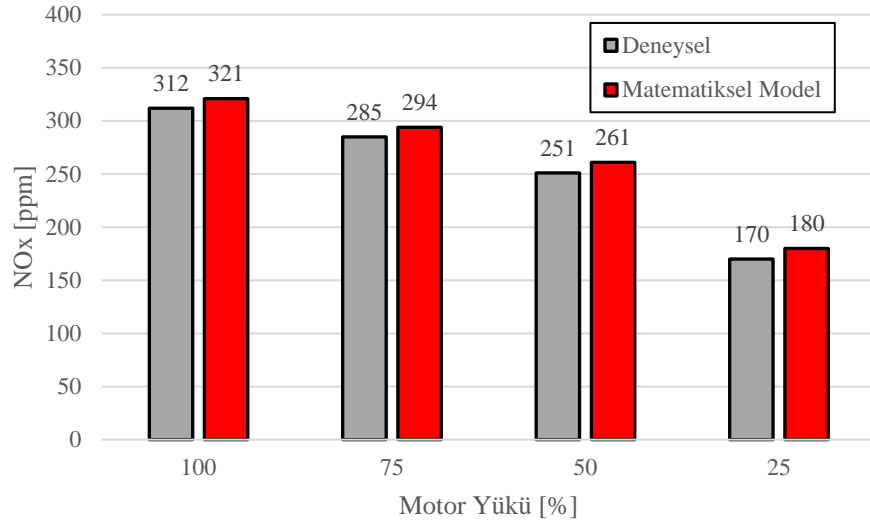
Şekil 3.3’de, CO emisyonlarının farklı yük kademelerinde değişiminin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, CO emisyonlarındaki sapmanın % 0 ile % 20 arasında değiştiği saptanmıştır. CO emisyonları açısından gözlenen bu farkın nedeni, ölçülen CO emisyonun değerlerinin % hacim değerine çevrilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.3 Farklı motor yüklerinde elde edilen CO emisyon değerleri

Motor yüküne bağlı olarak NO_x emisyonlarındaki deneysel ve matematiksel model sonuçlarının değişimi Şekil 3.4’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan,

deneySEL veriler ile matematikSEL veriler karşılaştırıldığında, %1,9 ila %2,8 arasında değişim olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.4 Farklı motor yüklerinde elde edilen NO_x emisyon değerleri

3.1.1 Maksimum belirsizlik değerleri

Çizelge 3.1’de matematikSEL modelin doğrulamasının özeti verilmiştir. DeneySEL ve teorik sonuçlar arasındaki farkın CO emisyonu haricinde kabul edilebilir mertebede olduğu sonucuna varılmıştır. CO emisyonlarında yüksek miktarda fark çıkmasının nedeni ise emisyon cihazının ppm hassasiyette ölçüm yapabilmesine rağmen, regülasyonlardan da bilindiği üzere % hacim emisyon ölçümünün yeterli olmasıdır.

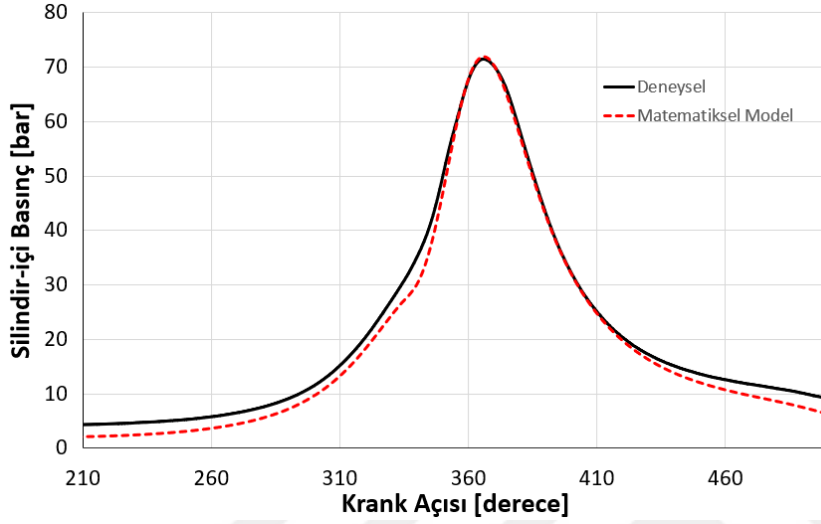
Çizelge 3.1 Belirsizlik değerleri

	DeneySEL	Teorik	% Maksimum Fark
Motor Gücü (kW)	11,6	12.1	4,3
Termik Verim (%)	15	14	6,6
CO (% hacim)	0,05	0,04	20
NO _x (ppm)	350	340	2,8

3.1.2 Silindir-içi basınç değerleri

Şekil 3.5’de, tam yük şartında silindir içi basınç verilerinin deneySEL ve matematikSEL model ile karşılaştırılması verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, maksimum basınç değerinin çok yakın değerlerde kaldığı, yine maksimum silindir

içi basınç verisinin aynı krank açısında açığa çıktığı sonucuna varılmıştır. Ancak, basınç verilerinin sıkıştırma ve egzoz stroklarında kabul edilebilir ölçülerde farklılıklar olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgular, deneysel sonuç ile matematiksel modelin doğrulandığı ve farkların kabul edilebilir mertebede olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 3.5 Deneysel sonuçlar ve matematiksel modelin karşılaştırılması.

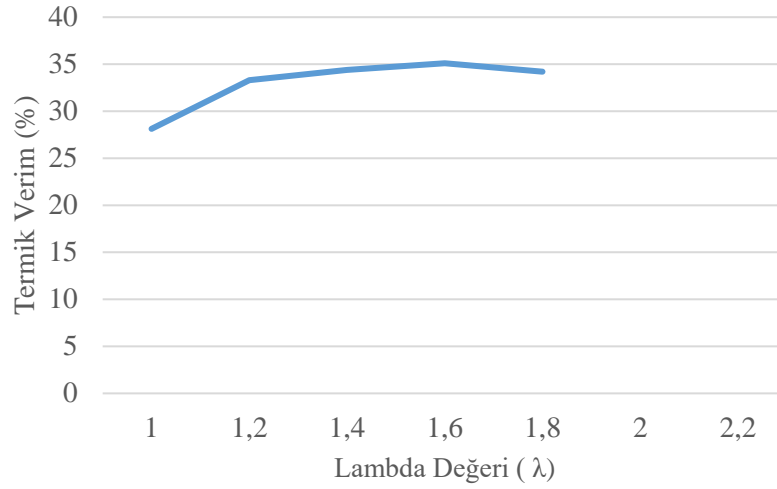
3.2 Deneysel verilerin analizi

Prototip olarak üretilen gaz motorunun öncelikle jeneratör ve sonrasında kojenerasyon sistemi haline getirilmesi sonrasında ünitenin test odası ortamına alınarak, yüke bağlı olarak devreye alma işlemlerine başlanmıştır. Sistemin çalıştırılıp, gaz hattı ayarlamaları ve sıfır basınç regülatörü ayarlamaları yapılarak basıncın +/-2 mbar aralığına ayarlaması yapılmıştır. Sente lambası ile ateşleme açısının doğru ayarlandığı kontrol edilmiş ve sistemin diğer ekipmanlarının fonksiyon testlerinin yapılması ile birlikte testlere geçilmeye hazır hale gelinmiştir.

Testlere başlanmadan önce motorun % 50 yük altında çalışarak ceket suyu termostatının açılması sağlanarak sistemin termik verime ulaştığı kontrol edilmiş ve testler esnasında motor blok suyu sıcaklığı 80 °C üzerinde +/- 5°C bandında tutulmuştur.

Sistem öncelikle tam yüke kadar 16° BTDC ateşleme değerinde yüke çıkarılmıştır, daha sonra çeşitli hava yakıt karışımı değerleri denenmiştir,

stokiyometrik yanma noktasından fakir yanma noktasına kadar çeşitli lambda değerlerinde yakıt tüketimleri takip edilmiştir (Şekil).



Şekil 3.6 Lambda değerine bağlı termik verim değişimi

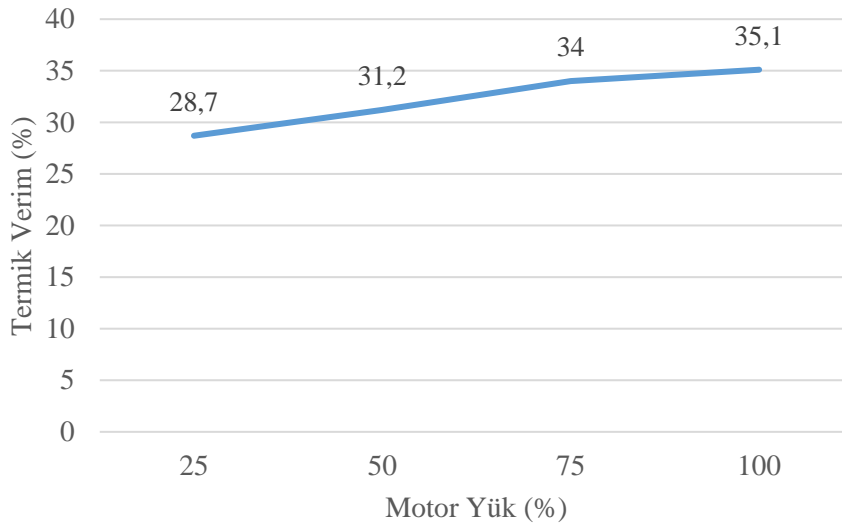
Termik verim Lambda 1 de 28,1; 1,2'de 33,3; 1,4'te 34,4; 1,6'da 35,1; 1,8'de 34,2 olarak hesaplanmıştır. Buna göre;

- İdeal lambda değerinin 1,7 λ seviyelerinde olduğu görülmüştür. Bu esnada kaydedilen termik verim değeri % 35,1 olmuştur.
- Yanma veriminin hava fazlalık katsayısının arttırılması ile artması sonucu termik verimde artış meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Hava fazlalık katsayısının artması ile termik verimin artması sonucu biyogaz karışımında ağırlıklı olarak bulunan metan yakıtının önemli miktarda alev sönme bölgeleri oluşturduğu göz önünde bulundurulduğunda artan hava fazlalık katsayısı ile bu bölgelerin kontrol altında tutulabildiği bulgusu tespit edilmiştir.
- Hava yakıt karışımının aşırı fakir şartlarda çalıştırılması sureti ile yanma fazlarında alev cephesinin önünde daha homojen bir ön karışım olması münasebeti ile daha yüksek verimli olduğu ve sıkıştırma ateşlemeli motor yanma verimlerine yaklaştığı tespit edilmiştir.
- Biyogaz yakıtlı motorda, biyogaz yakıtının yüksek oranda inert gaz olan CO₂ içermesi ve oldukça fakir karışım şartlarında çalışılması sebebi ile motorda vuruş sınırına ulaşmadan yüksek sıkıştırma oranlarına ulaşılabilmesi ve motorun turboşarj sisteminin bulunması sayesinde termik verimlerin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Tasarlanan motorun tabi olduğu emisyon limitlerinin de Ta-Luft 2002 limitleri olması sebebiyle, katalizör kullanımı olmadan motorun fakir yanma dışında bu emisyon seviyelerini yakalaması için fakir yanmalı olması zorunluluğu mevcuttur.

1,7 λ üzerine çıktığında ateşleme enerjisi 250 mJ değerinin üzerine çıksa dahi motorda ateşleyemem durumu görülmeye başlanmıştır. Ateşleyememe başlangıcı için 1,8 λ limit değer olarak ölçülmüştür.

Kojenerasyon uygulamasında motorun sabit devir, değişken devir olarak kullanılacak olması sebebiyle, motorun % 25 yükten tam yüke kadar verim değerlerinin kaydedilmesi maksadıyla da yük testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).

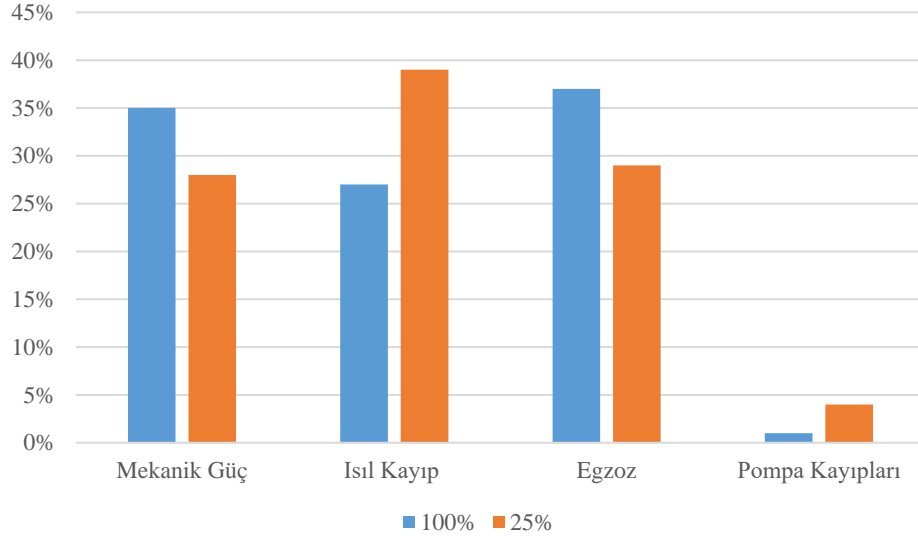


Şekil 3.7 Yüke bağlı verim değişimi.

Bu testlerde % 25 yükte yanma basıncının düşmesi, ısıl ve pompa kayıplarının toplam enerji girdisi içerisinde payının artması sebebiyle motor veriminin düştüğü görülmektedir. Buna göre motorun çalıştığı müddetçe yüksek yük bandında yüklenmesinin toplam işletme maliyeti açısından avantajı görülebilmektedir.

Motor yükünün düşmesi ile fakir karışım teşkilinde çalışan biyogaz yakıtının yanma veriminin olumsuz şekilde etkilenmesi, alev sönme bölgelerinin artması sebebi ile termik verimde önemli miktarda düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir.

Sabit devir, değişken yük altında çalışan motorlarda tüm kayıplar yüke bağlı lineer olarak artmadığından dolayı, yanma verimi ve turbo şarj haritasının kayması dışında diğer kayıpların oranı düşük yükteki motorda verimin düşmesinin diğer sebebidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Yüke bağlı olarak motorda enerjinin dağılımı

Şekil 'te % 25 ve % 100 motor yükünde enerji dağılım oranları verilmiştir. Enerjinin dağılımına bakıldığında, artan motor yükü ile birlikte mekanik yük çıkıntısının arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, motor yükünün düşmesiyle birlikte ısı kayıpların önemli miktarda arttığı tespit edilmiştir. Burada, düşen yanma verimleri ile birlikte ısı kayıpların arttığı sonucu açığa çıkmıştır. Egzoz kayıplarına bakıldığında, artan motor yükü ile beraber, yakıt ve güç artışı ile beraber egzoz gazlarının enerji oranının da değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, pompalama kayıplarına bakıldığında, pompalama kayıp enerjisinin sabit kalmasına rağmen, düşük motor yükünde oransal olarak arttığı sonucuna varılmıştır.

Yapılan testler sonucunda tam yük altında motor üzerinde turbo kompresör ve türbin tarafındaki sıcaklık ve basınç verileri okunmuş (Çizelge 3.2) ve bu verilerin üretici verileri ve analizler ile kıyaslaması yapılarak uygunluğu kontrol edilmiştir.

Çizelge 3.2 Gaz motoru test verileri.

Parametreler		Ölçüm Sonuçları
Lambda	-	1,68
Çıkış Gücü	kW	48
Termik Verim	%	35,1
Hava / Yakıt Oranı	-	28,3
Kompresör Giriş Basıncı	bar	0,99
Kompresör Çıkış Basıncı	bar	2,7
Kompresör Giriş Sıcaklığı	°C	38
Kompresör Çıkış Sıcaklığı	°C	198,2
Türbin Giriş Basıncı	bar	2,7
Türbin Çıkış Basıncı	bar	1,02
Türbin Giriş Sıcaklığı	°C	597,3
Türbin Çıkış Sıcaklığı	°C	460,3
Emme Manifold Basıncı	bar	2,7
Emme Manifold Sıcaklığı	°C	42,1
Yağ Basıncı	bar	5,6
Yağ Sıcaklığı	°C	94
Ceket Suyu Çıkış Sıcaklığı	°C	85

Çizelge 3.3'de fakir yanma sonucu gaz motorunda elde edilen emisyon ve geri basınç değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Gaz motoru emisyon ölçüm değerleri.

O ₂ (%)	8,6
CO ₂ (%)	3,8
CO (ppm)	870
NO (ppm)	175
NO ₂ (ppm)	137
NO _x (ppm)	312
Lambda (λ)	1,68
Geri Basınç (mBar)	50

Elde edilen emisyon sonuçları irdelendiğinde, CO emisyonlarının ppm mertebesinde oldukça düşük olduğu, regülasyonların altında bir değer olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgularda, hem oldukça fakir karışım teşkiliyle çalışılıyor olması, hem de yüksek sıkıştırma oranları ile çalışılıyor olması sebebiyle yanma veriminin artması etkili olmuştur. Diğer taraftan, artan hava fazlalık katsayısı ile

yakıt oksidasyonunun artması sonucu CO emisyonlarında iyileşme meydana gelmiştir. Bu sebepten dolayı, elde edilen CO çıktıları üç yollu katalitik konvertör olmadan dahi kabul edilebilir sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

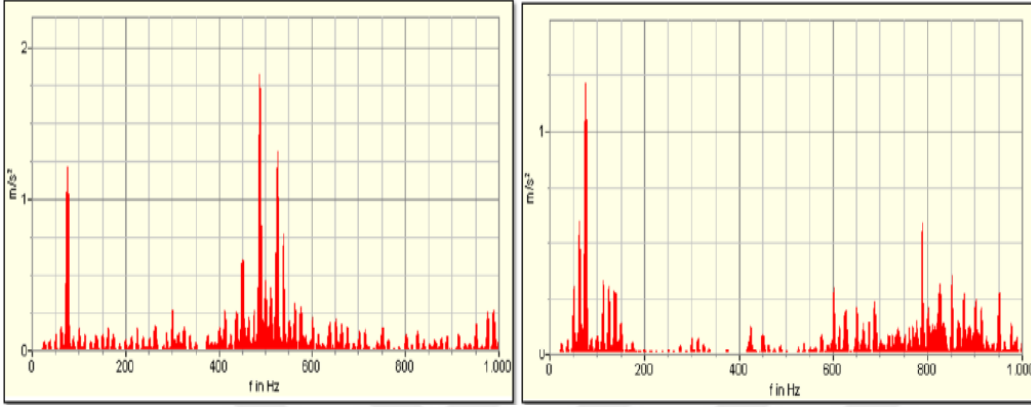
Elde edilen NO_x değerlerine baktığımızda, değerlerin oldukça düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. NO_x değerlerinin bu mertebede düşük çıkmasının en büyük nedeni, yüksek hava fazlalık katsayısı ile düşük alev hızlarıdır. Zira, yüksek hava fazlalık katsayısı sebebiyle oldukça fakir karışım şartlarında çalışılması sebebiyle NO_x oluşum mekanizması olumsuz etkilenmektedir. Diğer taraftan, biyogaz yakıtının içerisinde önemli miktarda CO₂ emisyonu olması sebebiyle, NO_x oluşum mekanizması olumsuz etkilenmektedir. Diğer taraftan, CO₂ gazının ve yüksek miktarda havanın ısı taşıma kapasitesinin artmasıyla ve aşırı fakir karışım ile alev hızının azalmasıyla, silindir içi basınç ve sıcaklıklarının düşmesi sonucu NO_x emisyonunun da düştüğü saptanmıştır. Elde edilen NO_x emisyon değerinin, günümüz motor teknolojisi ve emisyon regülasyonları göz önünde bulundurulduğunda, oldukça iyi mertebede olduğu, EGR ve yanma sonrası iyileştirme sistemleri ile elde edilen sonuçlara yakın olduğu sonucuna varılmıştır.

Motorun tam yükte çalıştırılması sonucunda elde edilen değerlere göre akustik değerleri ölçülmüştür, buna bağlı olarak motor alternatör akuplajının altı noktasından alınan akustik ölçümler frekans bantlarına göre ayrıştırılarak listelenmiştir. ISO 3744 standardına göre yapılan testlerin sonuçları işlenerek motorun akustik spektrumu (Çizelge 3.4) kaydedilmiştir.

Çizelge 3.4 Akustik ölçüm sonuçları.

1/1 Oktav Bant Merkez Frekans (Hz)	A Alternatör Taraf (Db)	B Motor Taraf Yan (Db)	C Motor Taraf (Db)	D Alternatör Taraf Yan (Db)	E Alternatör Taraf Üst (Db)	F Motor Taraf Üst (Db)
63	91,641	98,753	92,993	98,921	94,437	92,978
125	93,079	93,361	94,401	93,09	95,364	95,466
250	91,802	99,858	93,220	98,288	93,311	99,903
500	94,716	96,896	94,552	91,114	91,362	99,309
1000	93,895	94,648	94,09	96,512	91,316	96,315
2000	92,685	95,064	94,503	92,221	93,386	65,807
4000	93,837	98,188	92,343	90,045	92,754	99,201

Motorun tam yük testleri esnasında ISO 8528-9 standardına uygun olarak titreşim ölçümleri yapılmıştır. 3 eksenli ivmeölçer tarafından toplanan veriler Dewe-43A model veri toplama sisteminde kayıt edilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Titreşim değerleri motor ve alternatör bağlantı ayakları ile şasi bağlantı noktalarından alınmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 FFT Analiz Grafiği.

Motorun komponentlerinde çalışma sonucunda bazı komponentlerin aşınması sonucunda yağda bu metallerin birikimi oluşmaktadır, buna istinaden yapılan yağ analizi ile parçalardaki aşınma, erken aşamada fark edilebilmekte ve buna göre parçalar kullanım dışı kalmadan önce olası hasarlar ve parçaların muhtemel ömürleri hakkında fikir yürütülebilmektedir. Aynı zamanda yağın temel özellikleri hakkında da yapılan FTIR testleri sonucunda TAN, TBN değerleri, viskozite, IpH gibi parametrelerin de takibi sağlanabilmektedir. Motorun sıfırncı ve bininci saatinde alınan yağ analizlerinde motor yağı ve motorun aşınma değerleri incelenmiştir. Kullanılan motor yağı analiz değerleri Çizelge 'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Motor yağı özellikleri

Viskozite @40°C, ASTM D7279	
Viskozite 40°C mm ² /s	129,3
Viskozite @100°C, ASTM D7279	
Viskozite 100°C mm ² /s	14
Toplam Asit Sayısı, ASTM D664	
Toplam Asit Sayısı mg KOH/g	2,94
Toplam Baz Sayısı, ASTM	
TBN mg KOH/g	3,6
Yağ Katkıları-ASTM D5185	
Baryum mg/kg	0
Kalsiyum mg/kg	1797,46
Magnezyum mg/kg	4,82
Fosfor mg/kg	316,8
Cinko mg/kg	422,27
Aşınma Metalleri-ASTM D5185	
Gümüş mg/kg	0
Aluminyum mg/kg	1,6
Krom mg/kg	0
Bakır mg/kg	2,89
Demir mg/kg	4,11
Nikel mg/kg	0
Kurşun mg/kg	0
Kalay mg/kg	0
Titanyum mg/kg	0
Vanadyum mg/kg	0
Diğer Metaller-ASTM D5185	
Bor mg/kg	0
Molibden mg/kg	0,72
Contaminants by ICP-ASTM D5185	
Sodyum mg/kg	2,39
Silisyum mg/kg	2,83
Yağ Analizi	
Glikol %	0
Nitration A/cm	15,68
Oxidation A/cm	17,18
Soot 1980 A/cm	0
Su içeriği %	0
IpH. ASTM D7946 *	
IpH	5,31

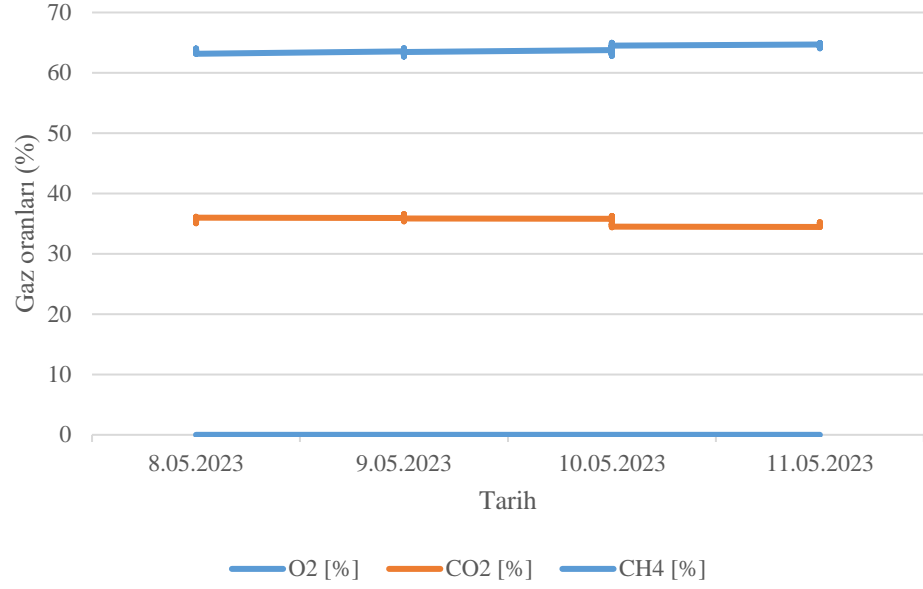
3.3 Saha kurulumu ve biyogaz ile yapılan testler

Biyogaz motorunun fabrikada yapılan prototip çalışmaları ve aplikasyon testinin tamamlanmasının ardından, ürünün kojenerasyon sistemi haline getirilmesiyle ilgili çalışmalar başlamış, sonrasında, Konya ili, Karapınar ilçesinde bulunan Gökcanlar çiftliğinde kojenerasyon sisteminin, biyogaz sistemine bağlantısı sağlanmıştır (Şekil 3.10). Yapılan saha kurulumu ile birlikte biyogaz motorunun üretilen biyogaz ile birlikte fabrika testlerine göre daha uzun süre çalışarak motorda özellikle H₂S tarafından oluşabilecek aşınmaların ve bunların ne nispette gerçekleştiğinin takip edilmesi hedeflenmiştir.



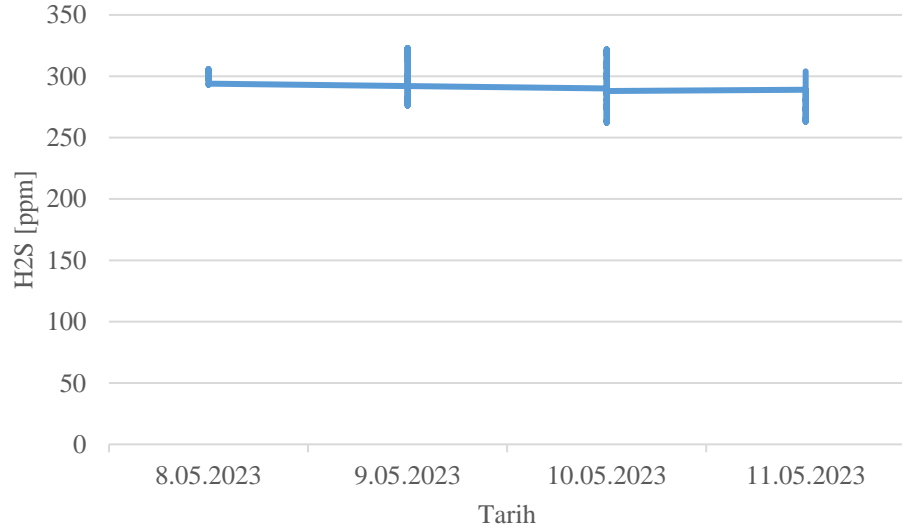
Şekil 3.10 Biyogaz tesisi saha kurulumu.

Sahada bulunan 100 m³ hacmindeki çürütücü içerisinde üretilen biyogaz, gazometre sistemi ile 250 mBar basınç altında motora ulaştırılmaktadır. Bu gazın içeriğindeki gaz bileşimi dört günlük bir çalışma sürecinde takip edilmiş ve % 61-64 CH₄ ve % 36-39 CO₂ gaz karışımı içerdiği görülmüştür (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Biyogaz gaz içeriği analizi.

Gaz bileşiği içerisinde ortalama 300 ppm H₂S ölçülmüştür (Şekil 3.12). H₂S gazının yağda ve motordaki komponentlerde yapacağı aşınmanın takibi amacıyla H₂S gazı aktif karbon filtre ile seyreltilmeden motora direkt beslenmiş ve motor ortalama 300ppm H₂S içeren biyogaz içeriği ile çalıştırılmıştır.



Şekil 3.12 Biyogaz H₂S oranı.

Motorun çalışma süreci boyunca biyogaz yakıtının gaz içeriği takip edilerek gaz içeriğindeki H₂S miktarının aşınmalara etkisinin olup olmadığı ve miktarı takip edilmiştir. Bu süreç içerisinde motorun yağ analizleri de yapılarak motor yağındaki

bozunma miktarı ve metal aşınmaları da kayıt altına alınmıştır. Motorun 1000 saatlik çalışma süreci sonrasında özellikle bakır içeriği yüksek olan alaşım parçalarının durumları incelenmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6 Motor yağı analiz değerleri (0 saat-1000 saat)

	0 Saat	1000 Saat
Viskozite @40°C, ASTM D7279		
Viskozite 40°C mm ² /s	129,3	160,9
Viskozite @100°C, ASTM D7279		
Viskozite 100°C mm ² /s	14	16,3
Toplam Asit Sayısı, ASTM D664		
Toplam Asit Sayısı mg KOH/g	2,94	3,6
Toplam Baz Sayısı, ASTM		
TBN mg KOH/g	3,6	2,8
Yağ Katkıları-ASTM D5185		
Baryum mg/kg	0	0
Kalsiyum mg/kg	1797,46	1295,74
Magnezyum mg/kg	4,82	5,96
Fosfor mg/kg	316,8	262,67
Cinko mg/kg	422,27	306,65
Aşınma Metalleri-ASTM D5185		
Gümüş mg/kg	0	0,38
Aluminyum mg/kg	1,6	2,86
Krom mg/kg	0	1,92
Bakır mg/kg	2,89	29,16
Demir mg/kg	4,11	45,28
Nikel mg/kg	0	0,71
Kurşun mg/kg	0	0,41
Kalay mg/kg	0	4,7
Titanyum mg/kg	0	0
Vanadyum mg/kg	0	0
Diğer Metaller-ASTM D5185		
Bor mg/kg	0	48,98
Molibden mg/kg	0,72	0,73
Contaminants by ICP-ASTM D5185		
Sodyum mg/kg	2,39	1,8
Silisyum mg/kg	2,83	2,79
Yağ analizi		
Glikol %	0	0
Nitration A/cm	15,68	26,43
Oxidation A/cm	17,18	22,73
Soot 1980 A/cm	0	0,97
Su içeriği %	0	0,08
IpH. ASTM D7946 *		
IpH	5,31	3,63

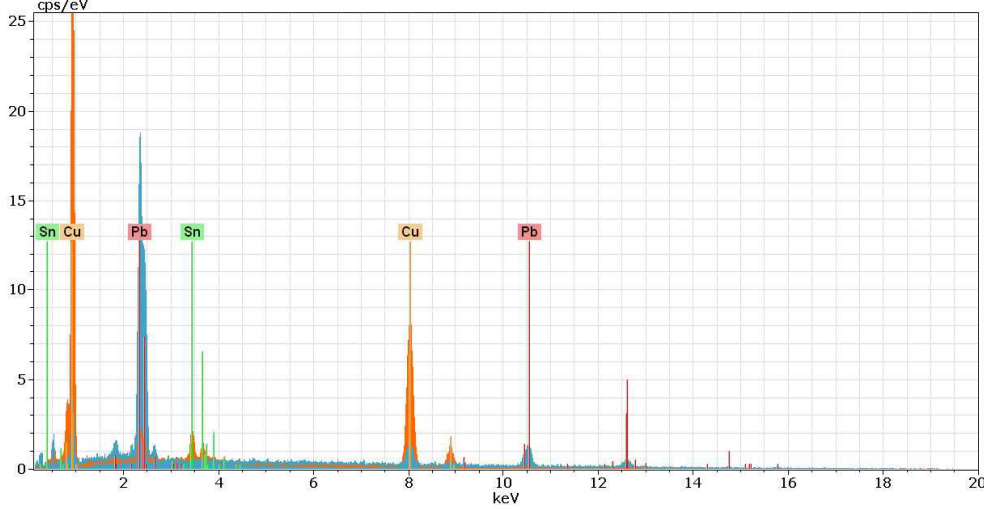
Yağ analizleri incelendiğinde viskozite değerlerinin beklenildiği gibi arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi yağ içinde bulunan aromatiklerin ve katkıların zaman içerisinde buharlaşması ve yağın giderek katranlaşması olarak literatüre paralel olarak değerlendirilmiştir (Tellier et al., 2013; Aytav et al., 2020). Ayrıca beklenildiği gibi Toplam asit sayısının arttığı toplam baz sayısının ise düştüğü tespit edilmiştir. Toplam asit sayısının artmasının sebebi olarak biyogazın yanması ise açığa çıkan sülfirik asitin zamanla yanma odasından kartere karışması olarak gösterilebilir. Burada yine kullanıma bağlı olarak toplam baz sayısının düşme sebebi ile yağda bazikliği sağlamak için kullanılan külün yanma ile birlikte oransal olarak azalması gösterilebilir. Burada kritik değer toplam baz sayısı değerinin toplam asit sayısına eşit olduğu noktadır, asit sayısının baz sayısını geçmesi motorda metal bozulmasını arttırıcı etki göstermektedir, bu sebeple motorlarda asit değerinin baz değerini geçmemesi istenmektedir. Yağ katkılarının değerleri kabul edilebilir sınırlarda olduğu için irdelenmemiştir. Aşınma metallerinde yine beklenildiği üzere hem çalışma süresinin artması hem de asit miktarının artması ile birlikte demir, bakır, alüminyum gibi metallerin aşındığı tespit edilmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda parçalarda koroziif aşınmalar görünmüş, yüksek sıcaklıktaki yağın temas ettiği alanlarda ve korozyonun sebep olduğu kavitasyon noktaları içerisinde karbon birikimleri görünmüştür (Şekil 3.13).



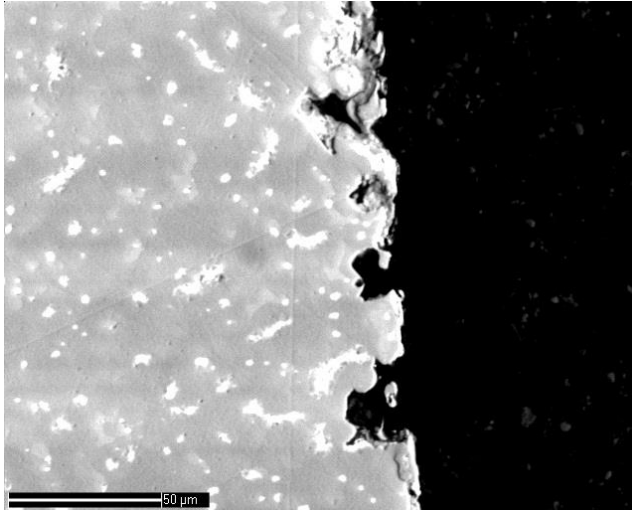
Şekil 3.13 Turboşarj thrust washer parçası görüntüsü.

Parçalara uygulanan spektroskopik analiz sonucunda parçayı oluşturan alaşımın içeriğinin bakır, kurşun, çinko elementlerinden oluştuğu görülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Thrust washer parçası spektroskopi analizi.

İncelenen parçaların yapılan SEM analizlerinde de yüzeyde korozyon sonucunda oluşan kavitasyonun incelenebilmesi imkânı oluşmuştur (Şekil 3.15). Oluşan kavitasyonlar ilerleyen zamanlarda daha da büyüyerek parça kopması ve üretim ölçümlerinin bozulmasına sebep olacaktır.



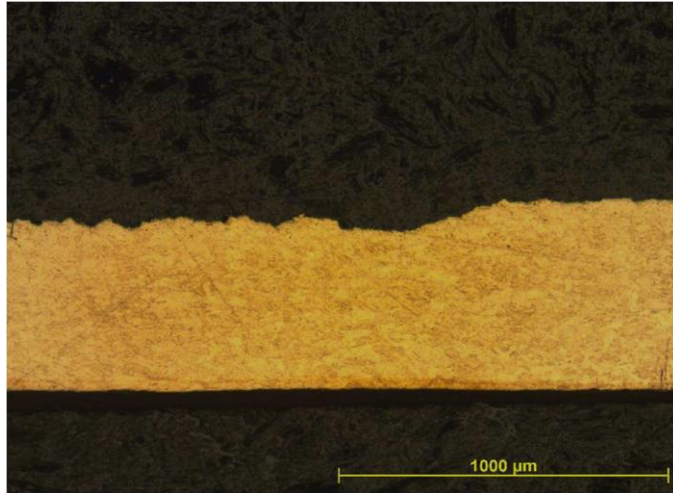
Şekil 3.15 Thrust washer parçası SEM görüntüsü

Kükürt elementi, bakır ile reaksiyona girerek bakır sülfat bileşimini oluşturmaktadır. Şekil 3.16'da SEM görüntüsünde sarı renkli oluşan bileşikler de bakır sülfat bileşiklerini göstermektedir.



Şekil 3.16 Thrust washer parçası SEM görüntüsü.

Motorda bakır içeriği yoğun bir diğer parça da yağ soğutucusudur, yağ soğutucusu motor bloğunda dolaşarak yağlama ve soğutma işlevi gören akışkan olan motor yağının su ile soğutulmasını sağlayan eşanjördür. Motordan sökülen yağ soğutucu borularının SEM görüntüleri (Şekil) incelendiğinde bakır boru kesitlerinde korozyon sonucunda oluşan kaviteasyon görüntüleri görülebilmektedir. İlerleyen zamanlarda bu kaviteasyonların bakır borularda delinme ve yağın suya karışması gibi motora zarar verebilecek durumlara sebep olabilme ihtimali yüksektir (Aytav et al., 2020).



Şekil 3.17 Yağ soğutucusu borusu SEM görüntüsü.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında seri üretimde bulunan bir dizel motor; tasarım, analiz ve prototipleme çalışmaları sonucunda biyogaz ile çalışmaya uygun bir hale getirilmiş, çalıştırılarak elde edilen veriler doğrultusunda yapılan analiz çalışmaları ile karşılaştırılmış ve sonrasında prototip motor, kojenerasyon ünitesine bağlanarak, paketleme çalışmaları tamamlanmıştır. Uzun dönem çalışma sonucunda motorda biyogaz içeriğindeki aşındırıcıların etkisinin gözlenerek kaydedilmesi amacıyla sistemin biyogaz sahasına kurulumu sağlanmıştır.

Simülasyon olarak tek boyutlu, quassi-statik olarak tabir edilen matematiksel model yardımıyla motor modellemesi yapılmıştır. Elde edilen çıktılarından, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, yazılımda motorun kabul edilebilir oranlarda fark meydana geldiği gözlemlenmiştir. Zira, motor gücünde maksimum % 4,3, termik verimde maksimum % 6,6, CO emisyonunda maksimum %20 ve NO_x emisyonunda maksimum % 2,8 oranında sapma meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, CO emisyonlarında yüksek belirsizlik değerinin çıkmasının nedeni ise, sonuçların ppm olmasına rağmen, günümüz motor teknolojisi ve emisyon regülasyon değerleri açısından oldukça küçük değerlerde olması sebebiyle % hacim değerine çevrilmiş olmasıdır. Bu kapsamda, gerçekleştirilen modelde en uygun sonuçların fakir yanma koşullarında olduğu ve verilerin deneysel sonuçlarla birebir örtüştüğü sonucuna varılmıştır.

Dinamometre ile gerçekleştirilen sonuçlarda, öncelikle farklı hava fazlalık katsayılarında termik verim değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, hava fazlalık katsayısı 1.68 değerinde iken maksimum termik verim değerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bunun üzerine farklı motor yüklerinde termik verim incelenmiştir. Akabinde, CO, NO_x emisyonu verileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, 1,68 hava fazlalık katsayısı çalışma şartlarında, vuruş ihtimali olmamasından ve yüksek sıkıştırma oranı ile çalışmadan dolayı yanma veriminin artmasıyla CO emisyonu değerleri düşük çıkmıştır. Diğer taraftan, yüksek hava fazlalık katsayısı ve oksijen oranı ile birlikte oksidasyonun artmasıyla CO emisyonlarında düşüş meydana gelmiştir. Diğer taraftan, NO_x emisyonları da regülasyon emisyon

değerlerine göre oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlardan, biyogaz yakıtında CO₂ inert gazının bulunması sebebiyle, silindir içi sıcaklığın düşmesi ve de oksijen ulaşılabilirliğinin azalması ile NO_x emisyonların önemli ölçüde iyileşme meydana gelmiştir. Enerji dağılımına bakıldığında ise artan motor yükü ile mekanik enerjinin arttığı, diğer taraftan artan motor yükü ile ısı enerjisi kayıplarının düştüğü sonucuna varılmıştır. Pompa kayıplarının ise her iki yük şartında da aynı olmasına rağmen, artan motor yükü ile düştüğü sonucuna varılmıştır.

Gerçekleştirilen yağ analizinde, sıfırıncı ve bininci saatlerde yağın fizikokimyasal değerleri karşılaştırılmıştır. Yağ içinde bulunan aromatiklerin ve katkıların zaman içerisinde buharlaşması ve yağın giderek katranlaşması ile viskozite değeri artmaktadır. Zamanla, toplam asit sayısının arttığı ve toplam baz sayısının ise düştüğü görülmüştür. Diğer taraftan, toplam asit sayısındaki artışın dizel motorda yanma sonucu açığa çıkan sülfirik asidin karter haznesindeki yağın içine kaçmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Yine, yağda bazikliği sağlayan külün azalması ile baz sayısında düşme meydana gelmektedir. Burada kritik değer toplam baz sayısı değerinin toplam asit sayısına eşit olduğu noktadır, asit sayısının baz sayısını geçmesi motorda metal bozulmasını artırıcı etki göstermektedir, bu sebeple motorlarda asit değerinin baz değerini geçmemesi istenmektedir. Aşınma metallerinde yine beklenildiği üzere hem çalışma süresinin artması hem de asit miktarının artması ile birlikte demir, bakır, alüminyum gibi metallerin aşındığı tespit edilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, matematiksel modelleme, deneysel laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ışığında prototip olarak tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen motorun, kojenerasyon seti haline getirilerek saha testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, motorla ilgili geliştirme çalışmalarının çıktıkları incelenmiş ve proje tasarım değerleri ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Çalışmanın tasarım hedeflerinden olan dizel motor ile parça ortaklaştırılması sağlanmış ve bu haliyle de motorun hedef performans değerleri TA-Luft 2002 emisyon değerlerine uyum gösterebilme şartı ile sağlanabilmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen veriler ile birlikte bundan sonraki akademik çalışmalarda farklı vizkozite değerlerinde yağ kullanımı ile birlikte motor parçalarındaki aşınma ve termik verim değişimi, e-turbo komponenti entegrasyonu ile birlikte gelecekte yürürlüğe girecek olan ½ TA-Luft 2002 emisyon sınıfı için uygunluğun sağlanması, hidrojen ve amonyak gibi karbon içermeyen gazlar ile tek ve çift yakıt uygulamalarının çalışılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anonim 1**, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/otto-cycle-otto-engine/actual-and-ideal-otto-cycle/> (Erişim tarihi: 13 Mart 2022)
- Anonim 2**, <https://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=18874&start=9330> (Erişim tarihi: 13 Mart 2022)
- Anonim 3**, <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyogaz.aspx> (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2022)
- Anonim 4**, <http://www.g-volution.co.uk/site/dualfueefficiency> Erişim tarihi: 18.01.2019.
- Anonim 5**, <http://www.southwestchptap.org/data/sites/1/events/2005-08-11/tower>.
- Anonim 6**, https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidrojen_sulfur, erişim tarihi 24.12.2020.
- Anonim7**, <http://europa.eu/documentation/official-docs/green-papers/indexen.htm# 2000>.
- Anonim 8**, http://www.biogasmx.eu/media/d3_8_new_lmcu_bgx_ue_standard_14_dec_10_vf_077238500_0948_26012011.pdf
- Anonim 9**, <http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E0b.htm>
- Anonim 10**, 1999, Biogas Digest Volume I- Biogas Basics, Information and Advisory Service on Appropriate Technology.
- Anonim 11**, www.geohive.com/GeoHive_Populationofcontinentsregionsandcountries/html (Erişim Tarihi, 02.01.2021).
- Anonim 12**, https://en.wikipedia.org/wiki/Bi-fuel_vehicle (Erişim Tarihi: 18.01.2022).
- Anonim 13**, Aktacir, C., 2014, Doğalgaz tesisatı ders notu.
- Anonim 14**, Hitit Üniversitesi, Deneysel çalışmalarda hata ve belirsizlik analizi.
- Aytav E., Kocar G., Teksan A.E., Sahin M.**, 2020 Experimental investigation of the effects of biogas source H₂SO₄ on engine oil and bearing materials in gas engines. Int J Energy Studies, 2020 71-87
- Asgari, M.J., Safavi, K. and Mortazainezahad, F.**, 2011, Landfill biogas production process, International Conference on Food Engineering and Biotechnology, Singapore, 208-2012.

- Awasume, I.E. and Sathiyaraj, A.P.J.**, 2011, Optimization of pre-hydrolysis condition for the production of biogas, University of Boras Master Thesis.
- Benz, W.**, 1985, (Gas Engine Handbook) and MWM Gasmotoren-Information (Gas Engine Information), Motorenwerke Mannheim, FRG, Gas Engines, KHD Deutz, Köln (Cologne), FRG.
- Bhatia, S. C.**, 2014, Advanced renewable energy systems, Woodhead Publishing, India, 743p.
- Bradley, D., Cavaliere, A., Cheng, R. K., Joannon, M. de, Dunn-Rankin, D., Evans, R. L., Keller, J., Levinsky, H., Mcdonell, V., Miyasato, M. M., Pham, T. K., Schefer, R. W., & White, C.**, 2011, Lean Combustion: Technology and Control, 261p.
- Bundele, H., Varma, P. S., Kurien, C., & Mittal, M.** (2023). Enhancement of Low Operating Load Limit and Engine Characteristics by Hydrogen Addition in a Biogas-Fueled Spark-Ignition Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 145(2), 1–13 pp. <https://doi.org/10.1115/1.4056101>
- Calle, F.R., Groot, P., Hemstock, S.L. and Woods, J.**, 2007, The Biomass Assessment handbook, Earthscan Publication.
- Chandekar, A. C., & Debnath, B. K.**, 2020, Effect of intake manifold design on the mixing of air and bio-CNG in a port-injected dual fuel diesel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(6), 2295–2309 pp. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09591-1>
- Çallı, B.**, 2012, Atıklardan biyogaz üretimi, Türkiye Kimya Derneği, Genç Kimyacılar Platformu.
- Çelikkaya, H.**, 2016, Biyogaz, Fırat Kalkınma Ajansı Araştırma Raporu.
- Demirbaş, A. ve Öztürk, T.**, 2005, Anaerobik digestion of agricultural solid residues, *Int J.Gren. Energy* 1:483-494.
- Demirbaş, A.**, 2008, Biofuels, Green Energy and Technology, Springer, s.87-89.
- Deublein, D. and Steinhauser, A.**, 2008, Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Dincer, I., & Rosen, M. A.**, 2015, Exergy analysis of heating, refrigerating and air conditioning, Netherlands, 387p.

- Drapcho, C.M., Nhuan, N.P. and Walker, T.H.**, 2008, Biofuels engineering process technology, Mc Grae Hill publication.
- Dursun, S. ve Özdemir, Z.Ö.**, 2016, Anaerobik bakteriler kullanılarak atıklardan biyogaz üretimi, Kimya ve Sanayi, Türkiye Kimya Derneği, 2, 7-22.
- Edwin, M., Jemila Percy, A., & Eniyan, M. C.**, 2023, Prediction of the emission characteristics of biogas as a supplementary fuel in SI engines using CFD to assess its applicability. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.247>
- Eryaşar, A.**, 2007, Kırsal kesime yönelik bir biyogaz sisteminin tasarımı, kurulumu, testi ve performansına etki eden parametrelerin araştırılması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Eryaşar, A. ve Koçar, G.**, 2009, Biyogaz üretiminde basıncın etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2, 181-186.
- Gupta, S. K., & Mittal, M.**, 2019, Effect of biogas composition variations on engine characteristics including operational limits of a spark-ignition engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(10), 1–24 pp. <https://doi.org/10.1115/1.4044195>
- Hai, T., Ali, M. A., Alizadeh, A., Sharma, K., Almojil, S. F., Almohana, A. I., & Alali, A. F.** (2023). Using nanoparticles for performance enhancement of a solar energy-driven power/hydrogen cogeneration plant based on thermochemical cycles: Multi-aspect analysis and environmental assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.158>
- Heywood, J. B.**, 1985, Internal Combustion Engine Fundamentals, USA: Mc Graw Hill, 490-685.
- Horpynko, Y. I., & Senetskyi, O. V.**, 2023, Activation of absorption chillers by the transit heat flow of the energy cycle in cogeneration solar systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 43, 101947 pp. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101947>
- Huang, J. and Crookes, R.J.**, 1998, Assesment of simulated biogas as a fuel for
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L. and Angelidaki, I.**, 2008, Effects of mixing on methane production during hermophilic anaerobic digestion of

manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 99, 4919-28.

Karagiannidis, A., 2012, Waste to Energy; Opportunities and Challenges for Developing and Transition Economies; Thessaloniki.

Karim, G.A. and Wierzba, I., 1992, Methane-carbon dioxide mixtures as a fuel. SAE Paper no 921557.

Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş., Bayrakçı, A.G. ve Aytav, E., 2013, Kırsal kesim biyogaz teknolojilerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, Devlet Planlama Teşkilatı GÜdümlü Teknoloji Geliştirme Projesi, Proje No: 07/DPT/003.

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

Kriaučiūnas, D., Žvirblis, T., Kilikevičienė, K., Kilikevičius, A., Matijošius, J., Rimkus, A., & Vainorius, D., 2021, Impact of simulated biogas compositions (CH₄ and CO₂) on vibration, sound pressure and performance of a spark ignition engine. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14217037>

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

Lalhriatpuia, S., & Pal, A., 2023, Computational optimization of engine performance and emission responses for dual fuel CI engine powered with biogas and Co₃O₄ nanoparticles doped biodiesel. *Fuel*, 344(January), 127892 pp. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127892>

Legrottagnie, F., Mattarelli, E., Rinaldini, C. A., & Scignoli, F., 2021, Application to micro-cogeneration of an innovative dual fuel compression ignition engine running on biogas. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100093 pp. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100093>

Leykun, M. G., & Mekonen, M. W., 2022, Investigation of the Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Biogas-Diesel Dual Fuel. *Fuels*, 3(1), 15–30 pp. <https://doi.org/10.3390/fuels3010002>

Liu, A., Yang, Y., Chen, L., Zeng, W., & Wang, C., 2020, Experimental study of biogas combustion and emissions for a micro gas turbine. *Fuel*, 267, 117312. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117312>

- Luostarinen, S., Normak, A. and Edstrom, M.,** 2011, Overview of biogas technology, knowledge report, Baltic Manure Business Opportunités, 9-19.
- Maakoul, O., Beaulanda, R., Abid, A., Essabri, E., & Omari, H. El.,** 2020, Dimensioning and modeling of a biogas valorization system by cogeneration. *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, IRASET 2020*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRASET48871.2020.9092189>
- Makareviciene, V., Sendzikiene, E., Pukalskas, S., Pimkus, A. and Vegneris, R.,** 2013, Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation, *Energy Conversion and Management*, 75, 224-233.
- Marchaim, U.,** 1992, Biogas Processes for Sustainable Development, Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN92-5-103126-6.
- Mitzlaff, K.V.,** 1988, Energies for biogas, A Publication of the Deutsches Zentrum Für Entwicklungstechnologien, 24-42.
- Neyeloff, S. and Cunkel, W.W.,** 1981, Performance of a CFR engine burning simulated anaerobic digester's gas. ASAE Publication, 2, 324-329.
- Park, S., Park, C., & Kim, C.,** 2011, Effect of exhaust gas recirculation on a spark ignition engine fueled with biogas-hydrogen blends. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2011-24-0115>
- Parawira, W.,** 2004, Anaerobic treatment of agricultural residues and wastewater application of high-rate reactors, PhD Thesis, Lund University, Sweden.
- Prashant, B., Khare, V., & Nema, S.,** 2020, Design and Optimization of Biogas Energy Systems, United Kingdom, 325p.
- Qian, Y., Sun, S., Ju, D., Shan, X., & Lu, X.,** 2017, Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 50–58 pp. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.059>
- Rosato, A., Sibilio, S., & Ciampi, G.,** 2013, Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application. *Applied Thermal Engineering*, 59(1–2), 599–617 pp. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.022>
- Rosen, M. A., Le, M. N., & Dincer, I.,** 2005, Efficiency analysis of a cogeneration

and district energy system. *Applied Thermal Engineering*, 25(1), 147–159 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.008>

Simsek, S., & Uslu, S., 2020, Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine. *Fuel*, 279, 118528 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118528>

Spiru, P., 2023, Assessment of renewable energy generated by a hybrid system based on wind, hydro, solar, and biomass sources for decarbonizing the energy sector and achieving a sustainable energy transition. *Energy Reports*, 9, 167–174 pp. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.316>

Striūgas, N., Tamošiūnas, A., Marcinauskas, L., Paulauskas, R., Zakarauskas, K., & Skvorčinskienė, R., 2020, A sustainable approach for plasma reforming of tail biogas for onsite syngas production during lean combustion operation. *Energy Conversion and Management*, 209, 112617 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112617>

Taheri, B., Jabari, F., & Akbari Foroud, A., 2023, A green cogeneration microgrid composed of water-source heat pumps, a gravity energy storage, and a bio-fueled gas turbine: Design and techno-economic optimization. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104594 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104594>

Tellier K., Murphy B., Zurlo J.R., Donahue R., 2013 Energy Efficient Gas Engine Lubrication. CIMAC Paper no 118.

Thring, R.H., 1985, Alternative fuels for spark-ignition engines, SAE Paper no 831685.

Türk Alman Biyogaz Derneği, Üretimden kullanıma biyogaz kılavuzu, Türk-Alman Biyogaz Projesi, 2011.

Yoon, S.H. and Lee, C.S., 2011, Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas-biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine, *Fuel Processing Technology*, 92, 992-1000 pp.

Zhang, Y., Zhu, M., Zhang, Z., & Zhang, D., 2017, Combustion and Emission Characteristics of a Spark Ignition Engine Fuelled with Biogas from Two-

Phase Anaerobic Digestion (T-PAD). *Energy Procedia*, 105, 137–142 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.292>

Zulkifli, N.W.M., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Shahabuddin, M. and Yunus, R., 2013, Wear prevention characteristics of a palm oil-based TMP (trimethylolpropane) ester as an engine lubricant, *Energy*, 54, 167-173.



ÖZGEÇMİŞ

Abdulhalik Emre TEKSAN, ilk ve orta öğrenimini Sezin Lisesi'nde tamamlamıştır. 2011 yılında Bahçeşehir Üniversitesi Enerji Sistemleri bölümünden mezun olmuştur. 2016 yılında İstanbul Bilgi Üniversitesi İşletme yüksek lisans programını tamamlamıştır. 2011 yılından bu yana Teksan Jeneratör firmasında çalışmaktadır, halihazırda Teknikten sorumlu yönetim kurulu üyesi görevini sürdürmektedir.

