



**KULLANILMIŞ LASTİK ATIKLARINDAN
ALTERNATİF YAKIT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU İLE İÇTEN
YANMALI MOTORLARDAKİ
UYGULAMALARI ÜZERİNE DENEYSEL
BİR ÇALIŞMA**

Turan DURNAGÖL

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER
Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANI
2022**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
ENERJİ BİLİM DALI

**KULLANILMIŞ LASTİK ATIKLARINDAN ALTERNATİF YAKIT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU İLE İÇTEN YANMALI MOTORLARDAKİ
UYGULAMALARI ÜZERİNE DENEYSEL BİR ÇALIŞMA**

(An experimental study on its applications in internal combustion engines with production
and characterization of an alternative fuel from waste of used tires)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turan DURNAGÖL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANİ

Erzurum
Mayıs, 2022

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ****Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü****TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI**

Turan DURNAGÖL tarafından hazırlanan “Kullanılmış Lastik Atıklarından Alternatif Yakıt Üretimi ve Karakterizasyonu ile İçten Yanmalı Motorlardaki Uygulamaları Üzerine Deneysel Bir Çalışma” başlıklı çalışması 31/05/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Enerji Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN <i>Erciyes Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Danışman:	Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. İsmail SOLMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Dr.Öğr.Üyesi Şükran EFE <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
İkinci Tez Danışmanı:	Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANI <i>Erciyes Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN**Enstitü Müdürü**

Aslı ıslak imzalıdır.

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP Yüksek Lisans bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2020-8664

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**Graduate School of Natural and
Applied Sciences**T.C.****ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ****Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü****ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU**

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER* danışmanlığında sunulan “Kullanılmış Lastik Atıklarından Alternatif Yakıt Üretimi Ve Karakterizasyonu İle İçten Yanmalı Motorlardaki Uygulamaları Üzerine Deneysel Bir Çalışma” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	12	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	11	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	9	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Turan DURNAGÖL	Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER
16.5.2022	16.5.2022
İmza: Aslı ıslak imzalıdır.	İmza: Aslı ıslak imzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocalarım Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER ve Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANI'ye şükranlarımı sunar, yıllar içinde bana verdikleri tüm emeklerden dolayı kendilerine sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmanın gerçekleşmesindeki katkıları nedeniyle, Otomotiv Teknikeri Dursun YAYLA, Öğr.Gör. Esenay ARSLAN ve Prof.Dr. Sebahattin ÜNALAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın kullanılan Pirolitik Yağın temini konusundaki destekleri nedeniyle ERA Çevre Teknolojileri. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde proje desteği sağlayan Atatürk Üniversitesi BAP Birimine (FYL-2020-8664), laboratuvar imkânları nedeniyle Erciyes Üniversitesine ve Atatürk Üniversitesine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; her zaman ve her koşulda yanımda olan, tüm imkân ve desteklerini eksik etmeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Turan DURNAGÖL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK LASTİKLERDEN ÜRETİLEN HAM PİROLİTİK YAĞ İLE FARKLI ORANLARDA DİZEL-BÜTANOL KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLARA OLAN ETKİLERİ

Turan DURNAGÖL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANİ

Bu çalışmada, geri dönüşümü yapılmış olan atık araç lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yağın farklı oranlarda dizel-bütanol karışımları hazırlanmış ve bu karışımların termofiziksel özellikleri belirlenerek karakterizasyonu yapılmıştır. Sonrasında, dizel motor performansı ve emisyonları üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Deneyler 1500 ve 2000 d/dak devir sayılarında, 5 farklı motor yükünde (0-12,5-25-37,5-50 Nm) 7 farklı karışım ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hacimce %1 setan sayısı geliştirici eklendi. Araştırmanın sonuçları, %50 pirolitik yağ karışımlarında bile motorun herhangi bir vuruntuya neden olmaksızın sorunsuz bir şekilde çalıştığını göstermiştir. En yüksek ÖYT değeri PO30Bü20CN1 yakıtı ile, en düşük ÖYT değeri ise D100 yakıtı ile kaydedilmiştir. NO_x emisyonları genellikle PO40Bü10CN1 karışımına kadar bütanolün varlığı ile azalmıştır. Tüm yük ve motor devir sayılarında, PO50 yakıtında tutuşma gecikmesi süresini uzadığını için silindiriçi basınçta ve sıcaklıkta ani bir artış meydana gelmiştir, bu durum ise PO50 yakıt için en yüksek NO_x oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca, en düşük FTV değerleri 1500 ve 2000 d/dak devir sayıları için sırasıyla % 8,28 ve % 6,72 ile PO30Bü20CN1 yakıtında gerçekleşmiştir. Bu çalışma, CI dizel motorlarda pirolitik yağ, bütanol ve dizelden oluşan üçlü yakıt karışımlarını geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık lastik, pirolitik yağ, motor performansı, egzoz emisyonları

Mayıs 2022, 59 sayfa

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

RECYCLING OF WASTE TIRES TO CRUDE PYROLYTIC OIL: ENGINE PERFORMANCE, COMBUSTION CHARACTERISTICS AND EMISSIONS ANALYSIS OF DIESEL-BUTANOL-CRUDE PYROLYTIC OIL BLENDS IN CI DIESEL ENGINES

Turan DURNAGÖL

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Co-supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Abdulaziz ATABANI

In this study, an effort to recycle tire waste into an alternative fuel was made. The produced pyrolytic oil was blended with diesel and butanol in different ratios. Following this blending strategy, engine performance, combustion characteristics and emissions analyses were experimentally examined in a CI diesel engine. Experiments were carried out with 7 different blends at 1500 and 2000 rpm and 5 different engine loads (0-12.5-25-37.5-50 Nm). In addition, 1% by volume cetane number improver was added. The main findings showed that even at 50% blends of pyrolytic oil, the engine still ran smoothly without causing any knocking in the engine. The highest BSFC value was recorded with PO30Bu20CN1 fuel, and the lowest BSFC value was recorded with D100 fuel. NO_x emissions generally decreased with the presence of butanol up to the PO40Bu10CN1 blend. At all loads and engine speeds, the ignition delay was prolonged causing a sudden increase in pressure and temperature in the cylinder for PO50 causing the highest NO_x formation for this fuel. In addition, the lowest BTE values were realized in PO30Bu20CN1 fuel with 8.28% and 6.72% for 1500 and 2000 rpm, respectively. This study supports the concept of developing a ternary fuels blends from pyrolytic oil, butanol and fossil diesel in CI diesel engines.

Keywords: Waste Tire, Pyrolytic Oil, Engine Performance, Exhaust Emissions

May 2022, 59 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	iii
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	12
GİRİŞ.....	13
KURAMSAL TEMELLER.....	17
Lastiğin Yapısı Hakkında Genel Bilgiler	17
Taşıt Lastiği	18
Taşıt Lastiğinin Bileşenleri.....	20
Atık Lastiklerinin Piroliz Yöntemi ile Geri Kazanımı	20
Piroliz Yöntemi.....	20
Pirolize etki eden faktörler.....	22
Reaktöre Giren Parçacıkların Boyutu	22
Biyokütle Bileşimi	22
Piroliz Ortamı.....	23
Basınç.....	23
Sıcaklık	23
Katalizör etkisi	23
Buhar Alıkonma Zamanı.....	24
Isıtma Hızı.....	24
Dizel Yakıt, Özellikleri, Emisyonlar ve Yanma	24
Dizel Yakıt.....	24
Viskozite	25
Setan Sayısı	25
Setan Sayısının Belirlenmesi	26
Setan İndisi.....	26

Isıl Değer.....	27
Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği.....	27
Yakıtın Yoğunluğu.....	28
MATERYAL VE METOT.....	29
Ham Pirolitik Yağın Üretimi.....	29
Karışımın Hazırlanması.....	29
TGA Analizi.....	30
DSC Analizi.....	30
FT-IR Analizi.....	31
Motor Performans ve Emisyon Analizi.....	31
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	35
Yakıt Karışımlarının Özellikleri.....	35
TGA Analizi.....	36
DSC Analizi.....	38
FT-IR Analizi.....	39
Motor Performans Analizi.....	40
Fren Özgül Yakıt Tüketimi (ÖYT).....	41
Fren Termal Verimi (FTV).....	44
Silindir İçi Basınç Verileri.....	46
Emisyon analizi.....	48
NO _x emisyonu.....	48
CO ₂ emisyonu.....	50
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	53
Sonuçlar.....	53
Öneriler.....	54
KAYNAKLAR.....	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Binek Araç ve Kamyon Lastiklerinin Bilesimi ve Ağırlıkları (Batır, 2002; Yakaboylu, 2010)	20
Tablo 2. Ürün Tane Boyutu ve Piroliz Ürün Verimi (Yılgin ve ark., 2005)	22
Tablo 3. Pirolitik Yağ ve Karışım Oranları	29
Tablo 4. Dizel Motorun Teknik Özellikleri	32
Tablo 5. Egzoz Emisyon Ünitesinin Ölçüm Aralığı ve Hassasiyeti	33
Tablo 6. Silindir İçi Basınç Sensörü, Amplifikatör ve Enkoderin Teknik Özellikleri	33
Tablo 7. Ham Pirolitik Yağ ve Karışımlarının Termokimyasal Özellikleri	35
Tablo 8. Ham Pirolitik Yağ ve Karışımlarının Yoğunluklarının Sıcaklıkla Değişimi	36
Tablo 9. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 Yakıtlarının TGA Sonuçları	38
Tablo 10. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 Yakıt Karışımlarının Kristalizasyon Başlangıç Sıcaklıkları	38
Tablo 11. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 Yakıtlarının Fonksiyonel Grup Frekansları	40

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Lastik Bileşenlerinin Şematik Gösterimi (Yakaboylu, 2010)	19
Şekil 2. Piroliz Sonucu Oluşan Katı, Sıvı ve Gaz Ürünleri.....	21
Şekil 3. Piroliz Akış Şeması ve Ürünleri (Yakaboylu, 2010)	21
Şekil 4. Setan Celtveli (Arı, 2018)	26
Şekil 5. Pirolitik Yağ, Dizel, Bütanol, 2-Ethylhexyl Nitrate ve Karışımları.....	30
Şekil 6. Motor Test Düzenegi ve Bileşenleri	32
Şekil 7. PO, D100 ve Bütanol Karışımlarının TGA Analizi (kütle kaybı ve sıcaklığın değişimi)	37
Şekil 8. PO, D100 ve Bütanol Karışımlarının Derivatif Termogravometrik (DTG) Analizi...	37
Şekil 9. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 Yakıt Karışımlarının Kızılöztesi Spekturumları (FR-IR).....	39
Şekil 10. 1500 d/dak'daki Motor Yüğü ile ÖYT'nin Değişimi	41
Şekil 11. 2000 d/dak'daki Motor Yüğü ile ÖYT'nin Değişimi	42
Şekil 12. 1500 d/dak'deki Motor Fren Termal Veriminin Motor Yüğü ile Değişimi.....	44
Şekil 13. 2000 d/dak'deki Motor Fren Termal Veriminin Motor Yüğü ile Değişimi.....	45
Şekil 14. 1500 d/dak'da (a) 12,5 Nm, (b) 25 Nm, (c) 37,5 Nm ve (d) 50 Nm Yüğü'te Krank Mili Açısına Göre Silindir İçi Basınçların Değişimi	46
Şekil 15. 2000 d/dak'da (a) 12,5 Nm, (b) 25 Nm, (c) 37,5 Nm ve (d) 50 Nm Yüğü'te Krank Mili Açısına Göre Silindir İçi Basınçların Değişimi	47
Şekil 16. Farklı Test Yakıtları ve Yüklere Göre NO _x Emisyonlarının Değişimi a) 1500 d/dak b) 2000 d/dak.....	49
Şekil 17. Farklı Test Yakıtları ve Yüklere Göre CO ₂ Emisyonlarının Değişimi a) 1500 d/dak b) 2000 d/dak.....	51

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Atık Lastik
ISO	: International Organization for Standardization
SI	: Setan İndisi
LPG	: Likit petrol gaz
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz
HPY	: Ham pirolitik yağ
ALPY	: Atık lastik piroliz yağı
ED	: Euro dizel
MS	: Motor silk
CFR	: Cooperative Fuel Research Motor
FTV	: Fren Termal Verimi
ÖYT	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi
PO	: Pirolitik yağ
PO100	: %100 Pirolitik yağ
D100	: %100 Dizel yakıt
PO30Bü20CN1	: %30 pirolitik yağ, %20 Bütanol, %50 dizel yakıt, %1 Setan sayısı iyileştirici
PO35Bü15CN1	: %35 pirolitik yağ, %15 Bütanol, %50 dizel yakıt, %1 Setan sayısı iyileştirici
PO40Bü10CN1	: %40 pirolitik yağ, %10 Bütanol, %50 dizel yakıt, %1 Setan sayısı iyileştirici
PO45Bü5CN1	: %45 pirolitik yağ, %5 Bütanol, %50 dizel yakıt, %1 Setan sayısı iyileştirici
PO50CN1	: %50 pirolitik yağ, %50 dizel yakıt, %1 Setan sayısı iyileştirici
PO50	: %50 pirolitik yağ, %50 dizel yakıt

Simgeler

ρ_y	: Yakıt Yoğunluğu
Pe	: Efektif Güç
mm	: Milimetre
°C	: Sıcaklık
CO	: Karbonmonoksit
NO_x	: Azotoksit
H₂	: Hidrojen
d/dak	: devir/dakika
CH₄	: Metan
MPa	: Megapaskal
Nm	: Newtonmetre

GİRİŞ

Enerji talebinin tüm dünyada her geçen gün artması, buna paralel olarak fosil kaynaklı yakıtların rezervlerinin azalması ve ülkelerin enerji üretim maliyetlerini azaltma çabaları, petrol türevi yakıtlara alkoller, biyodizel, LPG ve CNG gibi alternatifler arama ihtiyacını ortaya çıkarmıştır (Atabani *et al.*, 2020; Murugan *et al.*, 2008). Bu sebeplerle, kaynakların etkin kullanılması ve ömrünü tamamlamış malzemelerin geri dönüşümleri yapılarak, tekrardan enerji üretimine katılması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, atık lastik çöplükleri insan sağlığına ve çevreye büyük zararlar vermektedir (Karagoz *et al.*, 2020; Kondor *et al.*, 2021). Hem bu atıkları bertaraf etmek hem de alternatif yakıt olması sebebiyle ÖTL'lerin geri dönüşümü yapılarak farklı ürünlere dönüşümü yapılmaktadır. Bu geri dönüşüm ürünlerinden biri olan ham pirolitik yağ (HPY), yüksek kalorifik değeri sebebiyle, içten yanmalı motorlar için geleneksel sıvı yakıtlara bir alternatif oluşturmaktadır (Islam *et al.*, 2008).

Literatürde, geleneksel olarak tüketilen dizel ve benzin yakıtı alternatif olarak, atık lastiklerden elde edilen ham ve distile pirolitik yağın farklı oranlarda yakıtlara karıştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır (Mikulski *et al.*, 2021).

Uyar and Aydın (2022); çalışmalarında petrol çamurundan katalitik piroliz yöntemi ile dizel benzeri bir yakıt üretmişlerdir. Doğrudan piroliz yöntemiyle üretilen ham pirolitik yağ yüksek kükürt içeriğine sahip olduğu için iki aşamalı kükürt giderme işlemine tabi tutulmuştur. Bu iki aşama sonunda kükürt içeriği yaklaşık olarak % 91,32 oranında azalmıştır. Elde edilen dizel benzeri yakıtın, yoğunluk ve viskozite değerlerinin dizel yakıtı oldukça yakın, kükürt içeriğinin biraz daha yüksek, setan sayısı ve kalorifik değerlerinin ise bir miktar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Dizel benzeri yakıtın motor performans ve egzoz emisyonları incelenmiş olup, üretilen yeni yakıtın dizel motorlarda sorunsuz bir şekilde kullanılabilceği sonucuna varılmıştır (Uyar and Aydın, 2022).

Atık lastiklerin pirolizi, lastik atıklarının yanlış imha edilmesine bir alternatif olarak gösterilmiştir. Uygun piroliz yöntemi ile daha kaliteli pirolitik yağlar elde edilebilir ve dizel yakıtlara karışımları sağlanarak gelişmiş özelliklere sahip daha düşük maliyetli alternatif yakıtlar üretilir. %100 plastik pirolitik yağın dizel motorlarda kullanılması motorda birçok modifikasyonu gerektirir. Bu yüzden saf plastik pirolitik yağ kullanmak yerine geleneksel dizel ile farklı oranlarda karıştırılarak kullanılması tercih edilir. Piroliz reaktöründe, atık lastikler ortadan kaldırılarak faydalı bir ürüne dönüştürülebilir. Atık ürünlerin pirolizi, atıkları enerjiye dönüştürmenin bir yoludur. Atık lastikler, piroliz yöntemiyle yüksek sıcaklıkta

oksijensiz ortamda termal olarak bozunmaya uğrarlarsa, ürün olarak karbon karası, pirolitik yağ ve gaz açığa çıkar. Reaktör sıcaklığının daha yüksek olduğu piroliz işleminde dizel yakıtı daha yakın yakıt özellikleri sağlanabilir (Wang *et al.*, 2016).

Umeki *et al.*, (2016), çalışmalarında lastik atıklarının termal bozulmasından elde edilen pirolitik yağ ile petrol dizelin farklı oranlardaki karışımların özellikleri araştırmışlardır. Atık lastikten üretilen piroliz yağı ve petrol dizelin karışımları karakterize edilmiştir. Siyah renkte bir sıvı olan atık lastik piroliz yağının (ALPY), viskozite ve yoğunluk değerleri sırasıyla 20 °C'de 5.39 mPas ve 0.93 g/cm³ olarak ölçülmüştür. ALPY'nın üst ısı değerleri, literatürdekine benzer (42 kJ/g), ancak dizel yakıttan biraz daha düşük olarak ölçülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada, bu pirolitik yağın tüm oranlarda dizel yakıt ile karıştırılabileceği ve böylelikle dizel yakıt ile karışım halinde otomotiv ve endüstriyel alanlarda geleneksel petrol yakıtlarının alternatif olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Umeki *et al.*, 2016).

Singh *et al.*, (2020), karışık plastik atıkların 450 °C'de katalitik olmayan pirolizi ile özellikleri benzin ve dizel gibi petrol türevi yakıtlara benzer yüksek oranda bir pirolitik yağ elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu plastik pirolitik yağın karakterizasyonunu yaparak dizel yakıt ile mukayese etmişlerdir. Ayrıca, 5 farklı oranda %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında dizel yakıtı katarak motor performans ve egzoz emisyon salınımlarını incelemişlerdir. Sonuçlar, plastik pirolitik yağın %50'ye kadar olan oranlarda dizel yakıtı karıştırılarak kullanılabileceğini göstermiştir (Singh *et al.*, 2020).

Biyoyakıtlar, taşımacılık sektörünün neden olduğu sera gazlarının azaltılmasının, kısa vadeli alternatiflerinden birisidir. Mikulski *et al.*, (2020) çalışmalarında, dizel yakıtta yaygın olarak kabul edilen metil ester bazlı karışımlara enerji tasarruflu bir alternatif olarak, damıtılmış lastik pirolitik yağ ile karıştırılmış, soğuk preslenmiş kolza tohumu yağının bir biyo bileşen olarak kullanılmasının fizibilitesini araştırmışlardır. Seçtikleri üçlü ve ikili yakıt karışımları motor testlerine tabi tutmuşlar ve yakıt bileşimi, motor performansı ve emisyonlar arasındaki dengeyi tanımlamayı amaçlamışlardır. Sonuçlar, katkı maddesi olarak destile pirolitik yağ ilave edildiğinde, kolza tohumu yağının büyük bir kısmını (hacimce % 55'e kadar) içeren yakıt karışımlarının etkili bir şekilde yakılabileceğini göstermiştir (Mikulski *et al.*, 2020).

Plastik atıkların 500-800°C arasındaki sıcaklıklarda hızlı pirolizi, ana ürün olarak koyu kahverengi bir sıvı (benzin, dizel ve ağır yağ karışımı) vermektedir. Wiriyaumpaiwong and Jamradloedluk (2017) çalışmalarında, polietilen ve karışık plastik atıkların hızlı pirolizinden

elde edilen iki pirolitik yağ örneğinin damıtılmasını incelediler. Birincisi, 60 dakika boyunca 180°C sıcaklıkta damıtılmışken ikincisi, 90 dakika boyunca 150°C ve 180°C sıcaklıkta damıtılmıştır. Damıtıkları yağın, pirolitik yağ numunelerinden daha açık bir renge sahip olduğunu gözlemlediler (Wiriyaumpaiwong and Jamradloedluk, 2017).

Karagöz et al., (2020) çalışmalarında, atık araç lastiklerinden üretilen pirolitik yağı dizel yakıtla farklı oranlarda karıştırarak motor performans ve emisyon değerleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonuçları %50 karışım oranına kadar atık lastik yağının dizel motorlarda herhangi bir modifikasyona ihtiyaç olmaksızın kullanılabileceğini ve bu yakıtın atık yönetimi ve petrol türevi yakıtların rezervinin tükenmesi sorununa bir alternatif olabileceğini öne sürmüşlerdir (Karagöz et al., 2020).

İlkılıç and Aydın (2011) çalışmalarında, atık lastiklerden laboratuvarında N₂ ortamında ve katalizör olarak Ca(OH)₂ kalsiyum hidroksit kullanarak alternatif bir yakıt üretmişlerdir. Ürettikleri ham pirolitik yağı 8 farklı karışım oranında dizel yakıtla karıştırmışlar ve motor testlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar %50, %75 ve %100 ham pirolitik yağ katkılı karışımların CO, HC ve SO₂ bileşenlerinin önemli derecede arttığını göstermiştir (İlkılıç and Aydın, 2011).

Simsek et al. (2021), pirolize edilmiş lastik yağının dizel motorlar için alternatif yakıt olarak kullanılabilirliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla, pirolize lastik yağı ALPY, euro dizel ED ve Motor Silk dizel yakıt katkısı MS kullanmıştır. Tezde, tek silindirli bir dizel motorda; ED, ED- ALPY ve ED- ALPY -MS karışımlarının performans ve emisyonlara etkisi deneysel olarak incelemişlerdir. Testler; tek silindirli bir dizel motorda 7 farklı yakıt karışımları ile değişik yük (500, 750, 1000, 1250, 1500 W) ve sabit motor hızında (3600 d/dak) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin ED içerisine ALPY ilavesinin egzoz emisyonu ve özgül yakıt tüketimini artırdığı tespit edilmiştir (Simsek et al., 2021).

Çelik (2019) çalışmasında, atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli bir motorda düşük reaktiviteli yakıt olarak kullanımı deneysel olarak araştırmıştır. Deneysel çalışmalar düşük reaktiviteli yakıtların kullanımına uygun olacak şekilde modifiye edilmiş tek silindirli, dört zamanlı ve direk püskürtmeli bir dizel motorda yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda yüksek reaktiviteli yakıt olarak petrol kökenli dizel yakıtı, düşük reaktiviteli yakıt olarak ise benzin ve ALPY kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, egzoz emisyonlarında ALPY'nın HC ve NO_x emisyonlarında,

benzinin ise NO_x ve is emisyonlarında düşüş yaşanmasına belirgin şekilde etki ettikleri tespit edilmiştir. Özgül yakıt tüketiminin benzin için en düşük, ALPY yakıtı için ise en yüksek olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, deneysel çalışmalarda ALPY ve benzinin HCCI motorda başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür (Çelik, 2019).

Dos Santos *et al.* (2020) çalışmalarında, ÖTL'lerin kimyasal bileşiklerine bakarak uygun piroliz yöntemi ile geri dönüşümünün nasıl olması gerektiği sorusunun cevabını aramışlardır. Lastik pirolizinden elde edilen sıvı yağın alkali ve alkenli hidrokarbonlar, polidöngüsel aromatikler ve terpenesler gibi değerli bileşenleri bünyesinde bulunduran kompleks bir karışım olduğu sonucuna varmışlardır (Dos Santos *et al.*, 2020).

Atık lastiklerin proseslerden geçirilmesi sonucu elde edilen pirolitik lastik yağı, alternatif yakıt olarak değerlendirilmesi hem ekonomik bakımından hem de çevre ve canlı hayatının korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Atık taşıt lastiklerinin alternatif bir yakıt kaynağına dönüştürülerek bertaraf edilmesi, çevre kirliliğinin önlenmesi ve doğal kaynakların ekonomik kullanılması bakımından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, atık taşıt lastiklerinden elde edilen ham pirolitik yağ ve dizel-bütanol farklı karışımlarının dizel motorunda kullanılabilirliği deneysel olarak incelenecektir. Literatürden farklı olarak, D100 ve PO50 yakıtı hariç tüm karışımlara hacimce %1 oranında setan sayısı iyileştirici ilave edilmiştir. Çalışmada hazırlanan tüm karışımları termofiziksel özellikleri (yoğunluk, viskozite, setan indisi, ısı değeri), TGA, DSC, FT-IR analizleri, özgül yakıt tüketimi, fren termal verimi, silindiriçi basınç verileri, NO_x ve CO₂ emisyonlarının analizleri yapılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Lastiğin Yapısı Hakkında Genel Bilgiler

Lastiğin Tarihçesi:

Tekerleğin, Sümer Uygarlığı tarafından icadından bugüne kadar 5000 yıldan fazla zaman geçmiştir. Bu zaman diliminde, tekerlek ve lastik tasarımı sürekli gelişmiştir. Bu gelişme, bugün kullandığımız lastiğin ana maddesi olan kauçuğun geliştirilmesi çalışmaları ile hızlanmış olup 20.yüzyılda üst seviyeler ulaşmıştır. Kristof Kolomb 1493'te, ABD'ye gittiği ikinci seyahatinde, kauçuğu gören ilk Avrupalı Bilim insanıdır. Bu tarihlerde, kauçuk güneş ve yağmur tanrılarına adak olarak sunulmakta ve ilaç olarak kullanılmaktaydı. 1736-1774 tarihleri arasında Güney Amerika'da bazı çalışmalar yapmak için bulunan Fransız bilim adamı, oradaki yerlilerin hevea adını verdikleri ağaçlardan bir karışım elde ettiklerini tespit etmiştir. Amazondaki yerliler, bu ağaçlara kauçuk adının geldiği düşünülen Kaa ve O-Çu adını veriyorlardı. Lastik sanayisinin hammaddesi olan Kauçuk 1800'lü yıllara kadar kendine fazla uygulama alanı bulamamıştır. Kauçuğun ilk uygulaması iki Fransız insanının silgi elde etmesiyle 1770 yılında başlar. Bundan sonraki süreçte 1823' lü yıllarda Charles Machintosh, fabrikasında kauçuğun benzinli çözeltisini ile çift yüzölçümüne empermeabl yapmıştır. Fakat bu tarihlerde yapılan kauçuk kötü bir kokmakta ve sıcaklık değişimlerden fazlaca etkilenmekteydi (Batır, 2002).

Türkiye'de, kauçuk bitkileri yetiştirme çalışmalarına 1923'ten sonra başlanmıştır. Kök-sakız ve Guayule bitkilerinin dikimleri yapılmış ve deneysel üretimleri yapılmış olmasına rağmen bu bitkiler iklim şartlarına uyum sağlayamadıkları için yetiştirilememiştir. II. Dünya Savaşı sırasında, Türk Ziraat Yüksek Mühendisi kauçuğu yabancı maddelerden elde etmiş ve bir üretim tesisi kurmuş olmasına rağmen, bu ürün savaş sonrası dışarıdan ithal edilen kauçukla çok fazla rekabet edememiştir. Ülkemizde lastik sanayisinin kurulması, 1927'li yıllarda çıkan sanayii teşvik kanunu ve 1929'li yıllarda kabul edilen gümrük himayeleri kanununa dayanmaktadır. İlk üretim fabrikası 1930' lu yıllarda üretime geçmiştir. Bu fabrika İstanbul'da 1800 den fazla ikili galoş ve lastik çizme gibi ürünlerin üretimi yapılmaktaydı. Bundan kısa bir süre sonra da araç içi ve dışı lastiklerin yapımına başlanmıştır. O tarihlerde, bazı ekonomik sıkıntılardan dolayı üretime kısa bir süre ara verilmiştir. Sonraki yıllardaki araç sanayisindeki gelişmeyle birlikte lastik sanayisi de gelişme göstermiştir. Lastik sanayi, 1950'lerde kenidini daha çok otomobil tekerleklerini kaplama şeklinde kendisini

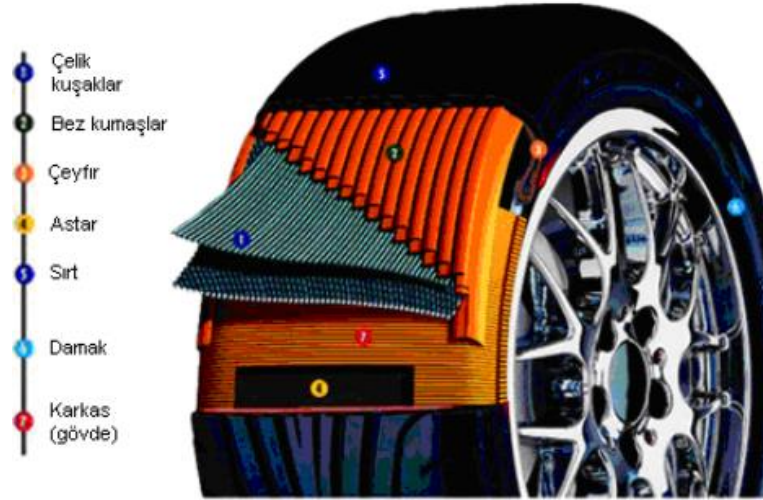
göstermiş olup, hem iç pazara hem de yurt dışına değişik ürünler üretir hale gelmiştir (Özden, 1990).

Taşıt Lastiği

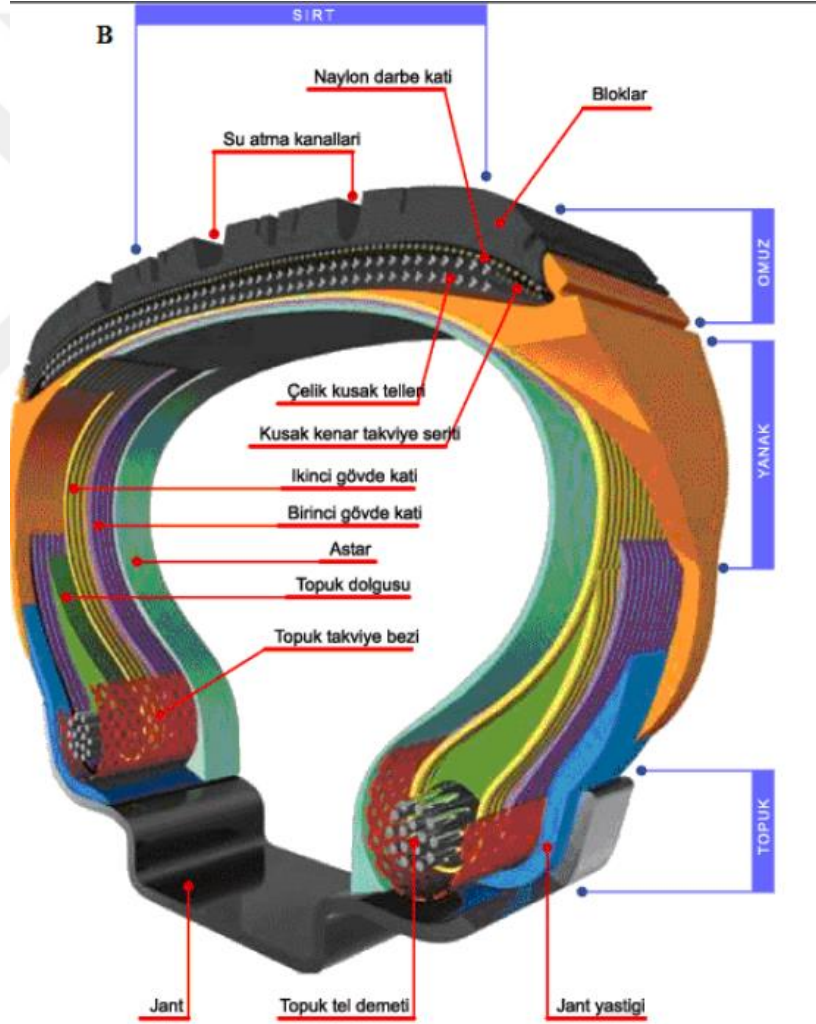
Taşıt lastiği, aracın hareket ve yük taşıma kapasitesi gibi ihtiyaçlarına göre tasarlanan, kauçuk, karbon siyahı, çelik tel ve çeşitli materyallerin bileşiminden oluşan bir üründür. Lastik, gövde, yanak, sırt, omuz, topuk ve astar olmak üzere 6 kısımdan oluşur. Şekil 1’de lastiğin kısımları şematik olarak gösterilmiştir. Lastiğin ana bileşenleri;

- a. Gövde:** Temas yüzeyinden gelen titreşim ve sesleri absorbe eden, yükü taşıyan ve lastik içindeki hava basıncını muhafaza eden bir bölgedir.
- b. Yanak (yanak yüksekliği):** Lastiğin yere temas eden noktası ile jant arasındaki mesafedir. Bu mesafe, lastiğin taban genişliğinin yüzdesel oranı olarak ifade edilir.
- c. Sırt:** Lastiğin yerle temasını sağlayan kauçuk bölüm sırt bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu kısmın yol tutuşunu, gücü, suyun atılmasını ve soğutma görevlerini yerine getirebilmesi için sırt bölümünün desenli olarak üretimi gerçekleştirilmektedir.
- d. Omuz:** Lastikte sırt ve yanığın birleştiği kısımdır. Kalın çaplı kauçuktan yapılmaktadır. Dışarıdan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı gövdeyi koruyan omuz bölgesi, aynı zamanda sırt bölgesindeki ısıyı dışarıya atma görevini de üstlenir.
- e. Topuk:** Lastiğin jantla temas ettiği ve yükleri taşıyan kısımdır. Bu kısım, jantın lastiği iyi kavramasını sağlamakta ve havanın dışarıya sızmasını engellemektedir. Topuk kısmı, kauçuk karışım ile birbirine bağlanmış olan topuk teli demeti, topuk dolgusu ve jant yastığından oluşmaktadır.
- f. Astar:** Lastiğin içindeki basınçlı havayı muhafaza eden ve içindeki havanın sızmasını engelleyen, lastiğin iç kısmındaki ince katmanlı kauçuktur (Yakaboylu, 2010).

A



B



Şekil 1. Lastik Bileşenlerinin Şematik Gösterimi (Yakaboylu, 2010)

Taşıt Lastiğinin Bileşenleri

Lastiğin içeriğinde; doğal kauçuk, suni kauçuk, karbon siyahı, çelik tel, kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar ve ozonlaştırmayı engelleyen kimyasallar maddeler bulunmaktadır. Tablo 1’de binek araç ve kamyon lastikleri için yaklaşık olarak bileşenlerin oranları verilmiştir.

Lastiklerin üretiminde ise, doğal kauçuk, suni kauçuk, kükürt ve kükürtlü bileşikler, silika, fenolik reçine, aromatik, naftanik ve parafinik yağ, çinko oksit, titanyum dioksit gibi dolgu malzemeleri, karbon siyahı, yağ asitleri ve çelik tel kullanılmaktadır.

Tablo 1. Binek Araç ve Kamyon Lastiklerinin Bilesimi ve Ağırlıkları (Batır, 2002; Yakaboylu, 2010)

Bileşim (% ağırlıkça)	Binek araç lastiği	Kamyon lastiği
Doğal kauçuk	14	27
Suni kauçuk	27	14
Karbon siyahı	28	28
Çelik	9,6-15	9,6-15
Bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar, ozonlaşmayı önleyici maddeler	16-17	16-17
Ortalama ağırlık	6,5-10	54

Atık Lastiklerinin Piroliz Yöntemi ile Geri Kazanımı

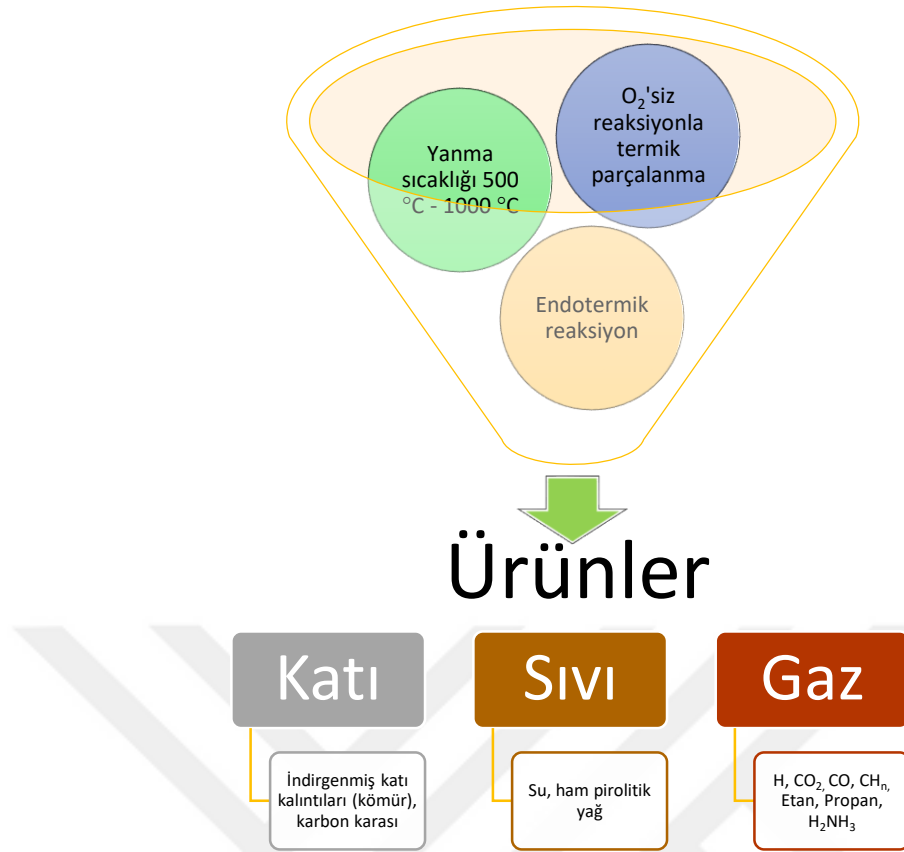
Piroliz Yöntemi

Tüm dünyada, yılda yaklaşık olarak 5×10^6 ton ve 4×10^9 adet lastik, siyah kirliklik olarak adlandırılan ciddi bir atık olarak oluşmaktadır (Boxiong *et al.*, 2007; Revelo *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

Piroliz, atıkların betaraf edilmesi ve geri kazanımının yapılarak enerji hammaddesi olarak kullanılması nedeniyle önemli bir kimyasal proses olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2 ve 3’de piroliz süreci ve ürünler gösterilmektedir.

Piroliz yönteminde, organik maddelerin oksijen olmayan bir ortamda veya inert ortamında 300 - 1000 °C arasındaki sıcaklıklara kadar ısıtılarak, malzemenin termal olarak bozunmasını sağlayıp katı, sıvı ve gaz ürünler oluşturma işlemidir. Atık taşıt lastiklerinin pirolizinde, lastiğin yapısında bulunan kauçuk malzemenin termal bozunması sağlanır. (Doğan, 2012; Uzun, 2020).

Piroliz işleminde oluşan gaz, esas olarak C1-C4 hidrokarbonlarından ve hidrojenden oluşur, bu gaz piroliz prosesine güç sağlamak ve enerji üretmek için yakılmak suretiyle kullanılabilir (Barbooti *et al.*, 2004).



Şekil 2. Piroliz Sonucu Oluşan Kati, Sıvı ve Gaz Ürünleri

Piroliz işlemi sonucunda birçok avantajı vardır:

- ✓ Geri dönüşüm sağlanır geride hiçbir atık bırakmaz.
- ✓ Çevre dostudur.
- ✓ Üretim esnasında hiçbir çevresel kirlilik oluşmaz.
- ✓ Ekonomiye destek sağlar.

Piroliz yönteminden çıkan diğer bir ürün olan gazlar ise yanıcı olma özelliği nedeniyle ister kendi tesisinin enerji ihtiyacını karşılamada istersede gaz olarak kullanım sağlanarak alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. Piroliz Akış Şeması ve Ürünleri (Yakaboylu, 2010)

Pirolize etki eden faktörler

Piroliz işleminde, pirolize etki eden faktörlerin başında reaktör tipi gelmekte olup, diğer parametreleri; reaktöre giren parçacıkların boyutu, biyokütle bileşimi, piroliz atmosferi, basınç, sıcaklık, katalizörün etkisi, buhar alıkonma süresi, ısıtma hızı ve reaktör konfigürasyonu olarak sıralayabiliriz.

Reaktöre Giren Parçacıkların Boyutu

Piroliz yönteminde reaktöre giren parçacıkların boyutu, doğrudan elde edilecek ürün çeşidi ve verimine etki etmektedir. Parçacıkların boyutu ve şekline göre reaktördeki ısı transfer mekanizması değişmektedir. Büyük şekilli malzeme yavaş ısındığı için ısı transferi daha geç gerçekleştiği için gaz ürün kapasitesi düşecektir. Parçacık büyüklüğünün etkisi üzerine yürütülen çalışmada, 50 mikron düzeyine kadar olan parçacıkların verime etkilerinin olmadığı tespit edilmiştir (Pangaliyev, 2014a).

Tablo 2’de, farklı reaktör sıcaklıkları için odunun flash pirolizinde tane boyutunun ürün fazının oranına (katı, sıvı ve gaz) nasıl etki ettiği görülmektedir. Benzer sonuçların tüm piroliz prosesleri için geçerli olduğu düşünülebilir.

Tablo 2. Ürün Tane Boyutu ve Piroliz Ürün Verimi (Yılgin *et al.*, 2005)

Sıcaklık		400°C			500°C			600°C		
Odun türü	Tane Boyutu (mm)	% Sıvı	% Katı	% Gaz	% Sıvı	% Katı	% Gaz	% Sıvı	% Katı	% Gaz
Meşe	8	45,87	30,84	23,29	53,15	22,68	24,17	55,56	20,61	23,84
	10	52,53	27,83	19,64	60,63	21,19	18,18	62,10	18,56	19,34
	12	56,03	31,94	12,03	57,47	26,12	16,41	58,29	22,88	18,83
Çam	8	50,76	24,80	24,44	50,55	22,44	27,01	51,48	18,74	29,78
	10	63,87	22,68	13,44	63,33	24,13	12,54	63,90	19,51	16,59
	12	64,29	26,92	8,79	63,07	24,48	12,45	64,33	20,27	15,40
Kavak	8	50,58	23,21	26,21	54,85	22,17	22,98	53,66	17,26	28,72
	10	54,75	26,09	19,16	57,23	19,51	23,26	60,49	20,26	19,25
	12	61,62	25,41	12,97	62,21	22,82	14,97	66,76	18,28	14,96

Biyokütle Bileşimi

Piroliz işlemine tabi tutulan biyokütle, içerisinde yaşayan ve ölmüş farklı türden bitkilerin hücrelerinden oluşan kompleks bir maddedir. Doğal olarak, biyokütlenin yapısı türediği bitkilere göre değişmektedir. Odunsu bitkiler %35 civarı selüloz, %27 civarı hemiselüloz ve %21 civarı lignin içermektedir. Piroliz işlemi sonrasında elde edilen maddeler, girdi malzemesinin çeşitliliği ve karmaşıklığına bağlı olarak ürünlür de birbirinden farklı özellikler gösterir. Biyokütlenin heterojenliği, ürünlerin kimyasal olarak değerlendirilmesinde büyük sorun oluşturur. Bu durum pirolizin sıvı ürün verimini de önemli ölçüde etkilemektedir (Altunbaş, 2016).

Piroliz Ortamı

Pirolizde elde edilen ürünlerin bileşimlerine ve verimlerine etki eden parametrelerden biridir. Biyokütlenin statik, sürükleyici gaz, su buharı ve hidrojen ortamında gerçekleşir (Minkova *et al.*, 1992).

Basınç

Piroliz prosesi yüksek basınçlı ortamda yapıldığında, sıvı ürün verimi düşük basınç piroliz prosesinden daha yüksek olmaktadır (Borgund and Barth, 1999). Basınç reaksiyonun hızına, yoğunluğuna, ivmesine ve daha birçok şeye etki etmektedir. Yüksek basınçta reaksiyon hızlanır ve hidrokarbon temelli gazların verimi artar; düşük basınç değerlerinde ise hafif yağ ve katran veriminde artış olmaktadır (Bridgwater, 2006).

Sıcaklık

Piroliz işleminde, en fazla etkili olan parametrelerden birisi de piroliz sıcaklığıdır. Pirolizin sıcaklığı, piroliz işlemi bittikten sonra ürünlerin ve miktarlarının farklı olmasına sebep olmaktadır (Altunbaş, 2016).

Piroliz işleminde sıcaklık 3 aşamada incelenebilir. İlk aşama katı ürünlerin veriminin yüksek olduğu ve sıcaklık değerlerinin 100 °C ile 300 °C düzeylerinde değiştiği aşamadır. İkinci aşama sıvı ürünlerin veriminin biraz daha yüksek olduğu ve sıcaklık değerlerinin 500 °C düzeylerinde değiştiği aşamadır. Üçüncü aşamada ise 700 °C seviyelerinin aşan çok yüksek bir ısı değerine ulaşılır ve bu aşamadan sonra genellikle CO, CH₄ ve H₂ gazları oluşmaktadır (Pangaliyev, 2014b). 250 °C piroliz sıcaklığında gaz ve sıvı ürün verimi artarken, 400 °C sıcaklık değerlerinin üzerindeki piroliz işlemlerinde sıvı ve katı ürün verimi gaza göre azalmaktadır (Zabaniotou *et al.*, 2000).

Katalizör etkisi

Piroliz sonucu oluşan bazı ürünler katalizör yardımıyla daha verimli ürünlere dönüştürülebilmektedir. Bu süreçte tercih edilen katalizörlerden birisi de zeolittir. Zeolit, katalizör etkisi ile piroliz esnasında oluşan buharı parçalar ve benzin gibi çeşitli hidrokarbon ürünlerinin oluşumunda önemli rol oynar (Sharma and Bakhshi, 1993; Taşçı, 2010).

Buhar Alıkonma Zamanı

Buhar alıkonma süresi elde edilen ürünlerin verimine önemli derecede etki etmektedir. Yaklaşık 600 °C sıcaklık değerinde 35 dakika buhar alıkonma süresince %16'lık sıvı ürün verimi alınırken, aynı sıcaklık değerinde 5 dakika alıkonma süresince %27'lik bir sıvı ürün verimi elde edilmiştir (Rahman *et al.*, 2001).

Isıtma Hızı

Pirolizde yapılan ısıtma hızı, işlem sonucunda meydana gelen ürünlerin çeşidini ve ürünlerin kimyasal yapısını belirleyen diğer önemli bir parametredir. Ancak, birçok ürün çeşitleri ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi konusunda ısıtma hızı, sıcaklık ve alıkonma süresi bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Isıtma hızına bağlı olan piroliz işlemi temel olarak hızlı piroliz ve yavaş piroliz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yavaş piroliz işlem basamakları yavaş gerçekleşmektedir ve bu yüzden reaktörde alıkonma süresi daha uzundur. Prosesde ham maddenin ısıtma hızı yavaş ise katı ürün eldesi yüksektir. Çünkü piroliz işlemi yavaş gerçekleştiği için daha fazla katı ürün eldesi olmaktadır. Bu işlemin tam tersi olan hızlı piroliz işleminde ise ısıtma hızının yüksek olması sonucu uçucu bileşiklerin verimi artar, sıcaklığa bağlı olarak sıvı ve gaz ürün verimi yüksek seviyelere çıkmaktadır (Sadıkoğlu, 2014).

Dizel Yakıt, Özellikleri, Emisyonlar ve Yanma

Dizel Yakıt

Dizel yakıt, parafin ve nafta gibi ürünlerden oluşan bir hidrokarbon karışımıdır. Buna ek olarak dizel yakıtların organik yapılarında doğal kükürt bulunmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda birden fazla yakıt kullanılmaktadır ve petrol ürünü yakıtların kullanılması daha çok yaygındır. Ham petrol çeşitli bileşenler içerir, bu bileşenlerin sahip oldukları farklı kaynama noktalarından yararlanılarak damıtma işlemi gerçekleştirilir ve işlem sonunda çeşitli petrol ürünleri elde edilmektedir (Çoştı, 2019).

Dizel yakıt, daha çok ham petrolün distile edilmesi ile oluşur ve kaynama noktası yaklaşık olarak 190 °C - 360 °C aralığında olan hidrokarbonlardan meydana gelir (Bosch, 2007). Yakıtın bileşimi ve özelliği, motor performans ve emisyonunu etkileyen en önemli parametredir. Örnek olarak, yüksek C/H oranlarına sahip yakıt daha düşük C/H oranına sahip

yakıta göre, çiftli bağlı karbonu içeren yakıtlar tekli bağlanmış olan karbon içeriği olan yakıta göre daha fazla is emisyonları elde etmeye meyillidir (Svensson, 2005).

Viskozite

Viskozite daha çok sıvı veya gaz halindeki bir akışkanın biçim ve şekil değişikliğine karşı gösterdiği bir dirençtir. Bu sebeple, viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanır. Yakıtın iç sürtünmelerin bir ölçüsü olan viskozite, yakıt pompasının performansını etkiler (Martinez-Martinez *et al.*, 2008).

Viskozite, yakıtın yanma odasına enjekte edilmesinden sonra, yakıtın atomizasyonunu ve sonuç olarak motor birikintilerinin oluşumunu etkiler. Genel olarak viskozite arttıkça; püskürtme atomizasyonunu ve yakıtın hava ile karışması olumsuz yönde etkilenir.

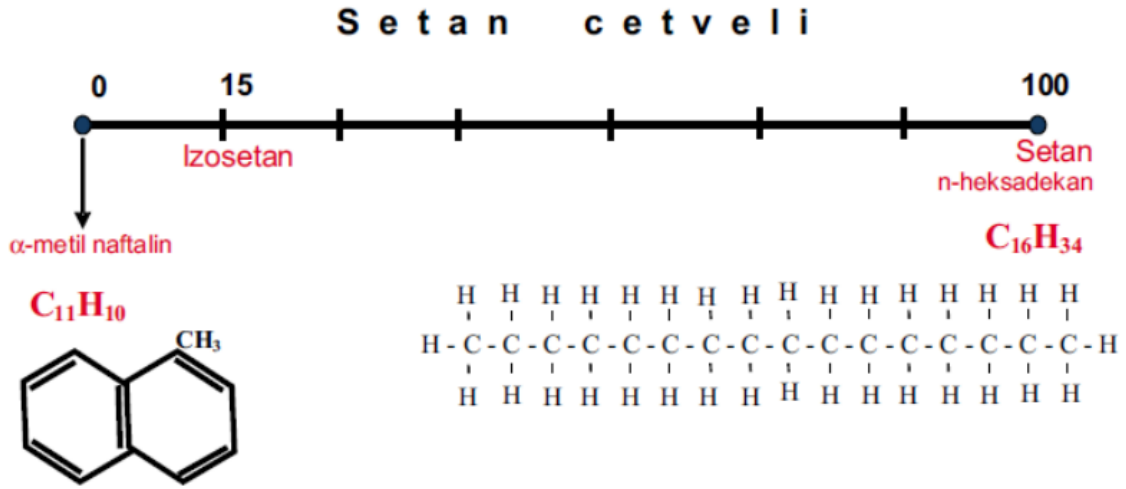
Viskozitesi yüksek olan yakıtlarda, yakıt hızı azalır, pompalama gücü artar ve motor düzgün çalışmayabilir. Ayrıca, yakıt enjektörden zor püskürtülür ve bu durum tutuşma gecikmesine sebep olur (Murugan *et al.*, 2008). Düşük viskoziteli yakıtlarda ise, pompanın içindeki yakıtta kaçaklar oluşabilir ve böylece yakıt miktarında azalma meydana gelir. Ayrıca, yakıtın yağlama özelliği de olumsuz etkilenir (Doğan *et al.*, 2012).

Setan Sayısı

Setan sayısı, dizel bir yakıtın tutuşma kalitesinin ifadesidir. Dizel motorda, setan sayısı yakıtın kendi kendine tutuşma kabiliyetini gösterir ve bu nedenle tutuşma gecikmesinde önemli bir parametredir. Yakıtın setan sayısı, kaynama noktası ve aromatik içerik ile de ilişkilidir.

Setan sayısı düşük olan yakıtlarda, sıkıştırma zamanı sonunda artan basınç ve sıcaklığa rağmen yakıt kendiliğinden tutuşamayarak belli bir faz farkı ile geç olarak yanar. Bu da motorun gürültülü çalışmasına sebep olan ve motora zarar veren tutuşma gecikmesine sebep olur. Aynı zamanda, setan sayısı düşük yakıtlar ağır hidrokarbonlar içerir ve yoğunlukları da fazladır (Krieger, 1966). Düşük setan sayısı soğukta ilk hareket rejimini zorlaştırır ve zararlı emisyonların artmasına neden olur (Oh *et al.*, 2003). Setan sayısı yüksek olan bir yakıtın, tutuşma kalitesi ve yakıtın kendi kendine tutuşabilirliği yüksek demektir. Setan sayısının yüksek olması motorun daha sessiz çalışmasını sağlar, soğukta ilk çalışma performansını ve emisyon değerlerini iyileştirir.

Setan sayısı belirlenmesi için iki adet referans sıvı kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi setan sayısı 100 olarak kabul edilen n-hexadecane, ikincisi ise setan sayısı 15 olan heptamethylnonane sıvısıdır (Yanowitz *et al.*, 2017). Şekil 4'de setan celtveli görülmektedir.



Şekil 4. Setan Cetveli (Arı, 2018)

Setan Sayısının Belirlenmesi

Herhangi bir yakıtın setan sayısını belirlemek için, ilk olarak setan ayısı araştırılan yakıt, sıkıştırma oranı değiştirilebilen bir CFR motorunda farklı sıkıştırma oranlarında yakılır, yakıtın vuruntusuz çalıştığı sıkıştırma oranı ve diğer şartlar belirlenir. Sonrasında, setan sayısı 0 kabul edilen α metil naftalin ile setan sayısı 100 olarak kabul n-heksadekan çeşitli oranlarda karıştırılarak, aynı şartlarda yakılır. Vuruntusuz çalışmanın gerçekleştiği yeni oluşturulan karışımlardaki n-heksadekan yüzdesi, araştırdığımız yakıtın setan sayısını vermektedir (Yanowitz et al., 2017). Bu testleri yapmak için gerekli olan standart motor ve referans yakıtlar ile uygulanacak metod ISO 5165 ve ASTM D 613 standartlarında belirlenmiştir (Öcal, 2006).

Setan İndisi

Setan sayısını belirlemede kullanılan CFR Dizel motoru çok pahalı olduğu için yakıtın tutuşma kabiliyetini belirlemek için setan indisi kavramı ortaya çıkmıştır. Setan indisi, yakıtın daha çok yoğunluk ve distilasyon değerlerinden yararlanarak hesaplanan bir kavramdır. Kısaca açıklamak gerekirse, yakıtın tutuşma kabiliyetini yakıta ait fiziksel özellikler kullanılarak belirlenmesidir. Bu amaçla, birçok denklem türetilmiştir ve genellikle kullanılan deney standardı ASTM D 976 göre ortaya çıkarılmış setan indisi denklemidir. Setan indisini belirlemek için denklem (1)'den yararlanılmaktadır (Doğan et al., 2012).

$$SI = (454,74 - (1641,416 \cdot \rho_y) + (774,74 \cdot \rho_y^2) - (0,554 \cdot T_{50}) + 97,803 \cdot (\log_2(T_{50}))^2) \quad (1)$$

ρ_y : Yakıt Yoğunluğu (kg/m^3 , 15 °C),

T_{50} : Distilasyon değeri ($^{\circ}\text{C}$),

SI: Setan İndisi.

Setan indisi de setan sayısı gibi yakıtın kendi kendine tutaşabilirliğinin bir göstergesidir. En büyük avantajı, yakıtın yoğunluk ve distilasyon değeri ile kolaylıkla hesaplanabilmesidir.

Isıl Değer

Isıl değer, yakıtın birim miktarının yakılması sonucu ortaya çıkan enerjidir. Dizel gibi sıvı yakıtlar için ısı değer kilogram başına ortaya çıkan enerjiyi ifade (kJ/kg) etmektedir. Isıl değer; alt ısı değer ve üst ısı değer olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Birim yakıtın tam yanma reaksiyonunda meydana gelen su; buhar fazı olması durumunda açığa çıkan enerjiye alt ısı değer, sıvı fazı olması anında ölçülen enerjiye üst ısı değer denir.

Dizel motorlarda, başta motorin olmak üzere çeşitli yakıtlar ve yakıt katkıları kullanılmaktadır. Bu, kullanılan yakıtlarının ısı değerlerinin de farklı olması anlamı gelmektedir. Motorda yanma reaksiyonu sonucu meydana gelen su, ortam şartları sebebiyle buhar fazında olduğundan, genellikle hesaplamalarda yakıtın alt ısı değeri dikkate alınmaktadır (Çoştı, 2019).

Distilasyon Özelliği ve Aromatik İçeriği

Distilasyon, yakıt içerisinde bulunan farklı C-H yapısındaki bileşenlerin farklı sıcaklıklarda buharlaşmaya başlaması ve kaynama sıcaklıklarının birbirinden farklı olması ile ilgili bir özelliktir. Distilasyon karakteristiklerini belirleyen en büyük etken yakıt bileşenleri olduğu gibi yakıtın yoğunluğu, viskozitesi ve setan indisi gibi parametreler de yakıtın distilasyon karakteristiklerini etkiler (Doğan, 2012).

Soğuk günlerde motorun çalışmasını kolaylaştırmak için uçuculuk özelliğinin yüksek olması tercih sebebidir. İdeal yanma için gerekli hava yakıt karışımının kolayca oluşturulmasında ve duman oranını düşürmede yüksek uçuculuk etkilidir. Küçük dizel motorlarda yüksek uçuculuk özelliğine sahip yakıtların kullanılması sonucu yakıt tüketimi azalmakta, egzoz sıcaklıkları ve emisyon değerleri düşmekte olduğu saptanmıştır. Düşük uçuculuğa sahip yakıtlardan verimli yanma elde etmek için ise yüksek devir aralıklarına sahip motorlar tercih edilmektedir (Albayrak, 2014; Sel, 2013).

Yakıtın Yoğunluğu

Birim hacimde bulunan maddenin miktarına yoğunluk (özkütle) denilmektedir. Yakıtın yoğunluk değeri ölçülürken ortamın özellikleri etkisi dikkate alınmalıdır. Bu yüzden ölçüm sonuçları referans sıcaklıklarıyla beraber (15 °C 900 kg/m³) ifade edilmektedir. Genel olarak yoğunluğu fazla olan yakıtın enerji potansiyeli daha yüksektir. Yakıtın yoğunluğu yakıtın özgül ağırlığı ile ilişkilidir ve aynı hacimdeki yakıt ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı şeklinde ifade edilir. Yakıt yoğunluğundaki değişim doğrudan püskürtülen yakıtın enerjisine etki ettiğinden, yüksek yoğunluğa sahip dizel yakıt ortalama indike basıncı yükselmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda yakıt yoğunluğunun artması silindire giren yakıt/hava oranının da artmasına neden olur ve karışım daha zengin bir hale gelir. Bu da bazı emisyonların artmasına neden olmaktadır (Doğan, 2012).

MATERYAL VE METOT

Ham Pirolitik Yağın Üretimi

ÖTL'ler, ilk olarak bünyesindeki çelik tellerden ayrılır. Sonrasında, küçük parçalar haline getirilir ve taşıyıcı bantlar vasıtasıyla piroliz reaktörüne taşınır. Piroliz işlemi sırasında, reaktör sıcaklığı 300-900 °C arasında değişmektedir. Oksijensiz ortamda gerçekleşen ısıtma işlemi sırasında ortama N₂ gazı da ilave edilir. Lastik buharı reaktörden alınarak kondenserde yoğunlaşması sağlanır. Farklı yoğunlaşma sıcaklıklarında farklı ürünler elde edilmektedir. Ham pirolitik yağ ticari bir firma olan ERA Çevre Teknolojileri A.Ş.'den temin edilmiştir.

Karışımın Hazırlanması

Çalışmada kullanılacak numuneler, Tablo 3'deki karışım planına göre % hacimce karıştırılmıştır. Karışım işlemine başlamadan önce ham pirolitik yağ filtre edilmiş ve tüm pirolitik yağ içeren karışımlara hacimce %1 olacak şekilde setan sayısı iyileştirici 2-ethylhexyl nitrate eklenmiştir.

Tablo 3. Pirolitik Yağ ve Karışım Oranları

Numune No	Numene Adı	Pirolitik Yağ (%)	Bütanol (%)	Euro Dizel (%)	Setan sayısı iyileştirici (%)
1	D100	0	0	100	0
2	PO30Bü20CN1	30	20	50	1
3	PO35Bü15CN1	35	15	50	1
4	PO40Bü10CN1	40	10	50	1
5	PO45Bü5CN1	45	5	50	1
6	PO50CN1	50	0	50	1
7	PO50	50	0	50	0

Karışımlar oluşturulurken, dizel yakıt hacminin toplam hacmin %50 olması ile deneyler sırasında vuruntusuz bir yanma oluşması sağlanmıştır. Şekil 5'de bütanol, 2-ethylhexyl nitrate, dizel yakıt ve ham pirolitik yağ ile hazırlanan tüm karışımlar görülmektedir.



Şekil 5. Pirolitik Yağ, Dizel, Bütanol, 2-Ethylhexyl Nitrate ve Karışımları

TGA Analizi

Termogravimetri (TG), belirli atmosfer ortamında örnek numunenin kütlesinin sıcaklıkla değişimini gösteren bir tekniktir. Bu teknik sayesinde, numune sabit oranda ısıtılırken ağırlık değişimi izlenerek, malzemenin termal kararlılığı ve uçucu bileşenlerin oranları belirlenir. Bu analiz sonuçları yatay ekseninde sıcaklık (belli artış hızlarında) düşey ekseninde ise kütle kaybı % cinsinden olacak şekilde çizdirilir. Diğer tekniklere göre daha ekonomik olan bu analiz (TGA), biyoyakıt endüstrisinde son yıllarda sıkça kullanılmaktadır (Groenewoud, 2001; Parker, 2001).

Bu tez kapsamında, D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 yakıtının TGA analizleri, 20 mg'lık platinyum (Pt) panlar içerisine numunler yerleştirilerek, Exstar 6000/6300 marka termal analizler (oda sıcaklığı - 1500 °C) ile gerçekleştirildi. Her bir analiz sonrası panlar temizlenerek diğer numunlerin analizine geçildi. Analiz sırasında, numuneler 20°C'den 750 °C sıcaklığa 10 °C/dak. hızında ısıtıldı. Her bir test yaklaşık 40 dak. sürdü. Tüm reaksiyonlar tamamlanana ve numune kütlesi sabit kalana kadar, maksimum sıcaklık olan 750 °C'ye kadar ısıtma işlemine devam edildi.

DSC Analizi

DSC numunenin sıcaklığı kontrollü bir şekilde arttırılırken numunenin aldığı veya verdiği ısıнын, sıcaklık veya zamanla değişiminin gözlemlendiği bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, malzemenin camsı geçiş, erime ve kristalleşme sıcaklıklarının, özgül ısı kapasitesinin ve termal kararlılık düzeyinin belirlenmesi için kullanılan yaygın bir yöntemdir. DSC ile aynı zamanda faz değişimlerinin hangi sıcaklıklarda görüldüğü de kolaylıkla tespit edilebilir.

D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 yakıt karışımlarının kristalizasyon sıcaklıklarını tespit etmek için DSC analizi gerçekleştirilmiştir. DSC analizi, soğutma sitemine sahip Perkin Elmer 8500 marka DSC cihazı ile gerçekleştirildi. (-180/750 °C). Testler N₂ atmosferi ortamında 20ml/dak inert gaz akışında ve 10 °C/dak soğutma hızında gerçekleştirildi. Her bir numune 5±0.5 mg ağırlığında idi ve her bir test yaklaşık 20 dak. sürdü.

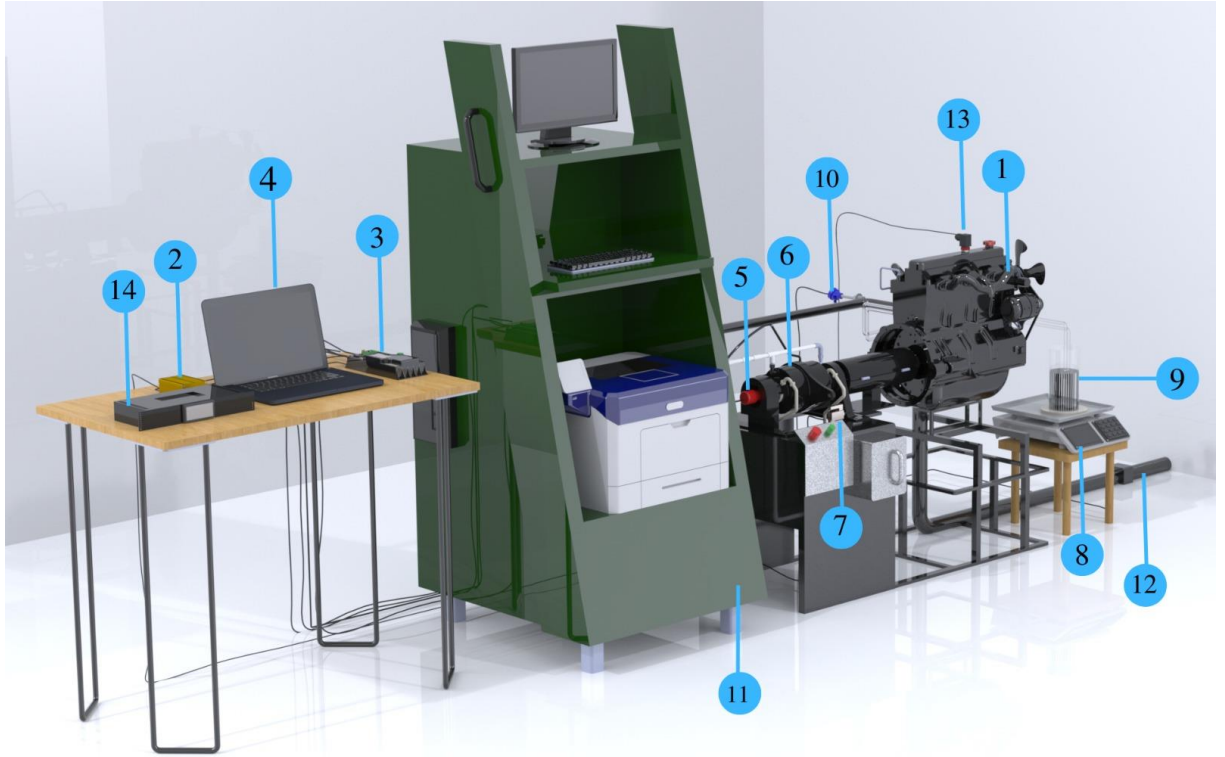
FT-IR Analizi

FT-IR, ister organik isterse de inorganik numunelerin içeriğinde bulunan kimyasal bağ, yapı ve fonksiyonel grup türlerini tespit etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimin oluşturduğu frekansa denk bir parmak izi olarak kızılötesi absorpsiyon spektrumunu üretilerek analiz yapılır. Bu spektrumlar maddeden maddeye değişiklik gösterir (Athar, 2015; Chrzanowski and Dehghani, 2013; Mohammed *et al.*, 2020; Prusty *et al.*, 2019).

D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 yakıtının FT-IR spektrumları Perkin Elmer cihazı kullanılarak, 4000-400 cm⁻¹ dalga boyu ve çözünürlüğü 4 cm⁻¹ olacak şekilde tarandı ve bir spektrum yazılım programı ile bilgisayara kaydedildi.

Motor Performans ve Emisyon Analizi

Motor deneyleri, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Motorlar Laboratuvarında yapılmıştır. Çalışmada, 3 silindirli Lombardini marka dizel motor, hidrolik dinamometre, dinamometre yük hücresi ve dinamometre kontrol paneli, silindir içi basıncı ölçmek için piezoelektrik basınç sensörü, amplifikatör, veri toplama kartı, motor devrini ve krank açısını belirleyen enkoder ve yanma analiz sistemi, egzoz emisyon cihazı ve ağırlık metoduyla kütleli yakıt tükemini ölçen terazi Şekil 6' de gösterilmiştir. Motorun teknik özellikleri ise Tablo 4'de verilmiştir.



1	Test motoru	8	Dijital terazi
2	Amplifikatör	9	Yakıt tankı
3	Veri toplama kartı	10	Egzoz sıcaklık sensörü
4	Bilgisayar	11	Emisyon cihazı
5	Enkoder	12	Egzoz hattı
6	Hidrolik dinamometre	13	Silindiriçi basınç sensörü
7	Yük hücresi	14	Devir sayısı ölçer

Şekil 6. Motor Test Düzeneği ve Bileşenleri

Tablo 4. Dizel Motorun Teknik Özellikleri

Tanım	Birim	Özellikler
Marka/Model		Lombardini / LDW 1003
Motor türü		Dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu (DI)
Silindir sayısı	adet	3
Silindir hacmi	cm ³	1028
Silindir çapı/kursu	mm/mm	75/77,6
Sıkıştırma oranı		22,8:1
Maksimum motor hızı	rpm	3600
Maksimum motor torku	Nm	67/@2000 rpm
Maksimum motor gücü	kW (HP)	19,5 (26,5)
N 80/1269/CEE-ISO 1585-DIN70020		
Soğutma tipi		Su
Maksimum güçteki özgül yakıt tüketimi	g/kWh	300
Maksimum güçteki yağ tüketimi	Kg/h	0,013
Motorun ağırlığı	kg	87

Bu çalışmada, egzoz emisyon analiz işlemleri için dizel ve benzinli motorlarda kullanılabilen, modüler yapıda bir mobil test düzeneği olan Tablo 5’de bilgileri sunulan Bosh firmasına ait BEA 270 tip egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır.

Tablo 5. Egzoz Emisyon Ünitesinin Ölçüm Aralığı ve Hassasiyeti

Bileşenler	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
CO	0,000-10,00 % Hacim	0,001 % Hacim
CO ₂	0,00-18,00 % Hacim	0,01 % Hacim
NO	0-5000 ppm Hacim	≤ 1 ppm Hacim
O ₂	0,00-22,00 % Hacim	0,01 % Hacim

Dizel deney motoru, 0-6500 d/dak motor devri ve 0-450 Nm tork ölçüm aralığı olan 1 gr hassasiyetinde Net Fren NF150 marka hidrolik dinamometre ile yüklenmiştir. Motor yükleri 0–200 kg aralığında ölçüm yapabilen CAS marka SBA 200L model yük hücresi ile motor yüklemeleri okunmuştur.

Silindir içi basıncı ölçümünde, Kistler marka 6052 C model piezoelektrik basınç sensörü kullanılarak elektrik sinyallerine dönüştürülmüş ve bu sinyalleri yükseltebilen ve hassas filtreleme özelliğine sahip basınç sensörü ile uyumlu amplifikatör kullanılmıştır.

Silindir içi basıncın krank mili açısı ile değişimini gözlemleyebilmek için kaplin ile dinamometreye bağlantısı yapılan Atek marka ARC S 50 model optik artımlı ölçüm yapan enkoder kullanılmıştır (Tablo 6). Deneylerde elde edilen silindir içi basınç ve krank mili açısı verileri National Instruments NI marka Usb 6210 model veri toplayıcı kartına (data logger) aktarılmıştır. Tüketilen yakıt miktarı 30 kg kapasiteli 0,01 gr hassasiyete sahip elektronik bir tartı ile yapılmıştır.

Tablo 6. Silindir İçi Basınç Sensörü, Amplifikatör ve Enkoderin Teknik Özellikleri

Silindir içi Basınç Sensörü		Amplifikatör		Enkoder
Marka-model Kistler-6052C		Marka-model Kistler-5018a		Marka-model Atek arc S50
Tip	Piezoelektrik	Kanal sayısı	1	Ölçüm aralığı(rpm) 0/6000
Ölçüm aralığı(bar) 0/250		Ölçüm aralığı(pC)2-220000		Çalışma sıc.(C) -25/+85
Çalışma sıc.(C) -20/350		Çıkış sinyal, volt -10/+10		Tepki frekansı(kHz) 300
		Frekans, kHz		0/200
		Çalışma sıcaklığı(C) 0/50		

Tüm ölçüm cihazlarından elde edilen veriler ile efektif güç ve özgül yakıt tüketimi değerleri aşağıdaki formüllerle hesap edilmiştir.

$$P_e = 2\pi nT \quad (2)$$

Burada, n rpm biriminden devir sayısını, T ise Nm biriminden torku göstermektedir. Bu durumda P_e efektif güç kW biriminden hesap edilmektedir.

Özgül yakıt tüketimi ve fren termal verimi ise

$$BSFC \left(\frac{g}{kWh} \right) = \frac{\dot{m}_y \left(\frac{g}{h} \right)}{P_e (kW)} \quad (3)$$

$$BTE (\%) = \frac{P_e (kW)}{\dot{m}_y \left(\frac{g}{h} \right) * H_u \left(\frac{kJ}{kg} \right)} = \frac{3600}{BSFC \left(\frac{g}{kWh} \right) * H_u \left(\frac{kJ}{kg} \right)} \quad (4)$$

formülleri ile hesap edilmiştir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yakıt Karışımlarının Özellikleri

Bu çalışmamızda hazırlanan numunelerin kimyasal özellikleri aşağıda Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Ham Pirolitik Yağ ve Karışımlarının Termokimyasal Özellikleri

Numune No	Numene Adı	40 °C de Kinematik vizkozite (mm ² /s)	Akma noktası (°C)	Setan İndeksi	Kalorifik değer (MJ/kg)
1	D100	2,26	-27	51,30	45,30
2	PO30Bü20CN1	1,72	-33	39,00	38,13
3	PO35Bü15CN1	1,20	-36	38,72	42,45
4	PO40Bü10CN1	1,10	-42	37,10	42,93
5	PO45Bü5CN1	0,90	-42	36,27	42,91
6	PO50CN1	1,77	-24	38,80	43,70
7	PO50	1,50	-24	37,53	43,09
8	PO100	0,60	-	31,91	42,43
9	n-Bütanol	3	-	25	34,32

Tablo 7 incelendiğinde, ham pirolitik yağın setan indeksi 31,91 ve kalorifik değeri 42,43 MJ/kg iken dizel yakıtın setan indeksi 51,30 ve kalorifik değeri ise 45,30 MJ/kg olduğu tespit edilmiştir. Diğer karışımlarda ise durum pirolitik yağ karışım yüzdesi %30 dan %50 ye artarken setan indeksi azalmakta, kalorifik değerler ise küçük artışlar göstermektedir. N-bütanolün setan indisi diğer alkollere nazaran yüksek olmakla beraber, pirolitik yağdan ve dizel yakıttan oldukça düşüktür. Bu durum yanma özelliklerini olumsuz etkilememiştir. Ayrıca, PO50 ile PO50CN1 karışımları için %50 pirolitik yağ katılmış olan numuneler ile %1 setan sayısı iyileştirici katılan numuneler karşılaştırıldığında, setan indeksinde yaklaşık %3,38 artış, kalorifik değerde ise %1,40’lık bir artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla, tüm bu karışımlara %1’lik bir setan sayısı iyileştirici katılması, benzer iyileşmeleri sağladığı değerlendirilmektedir.

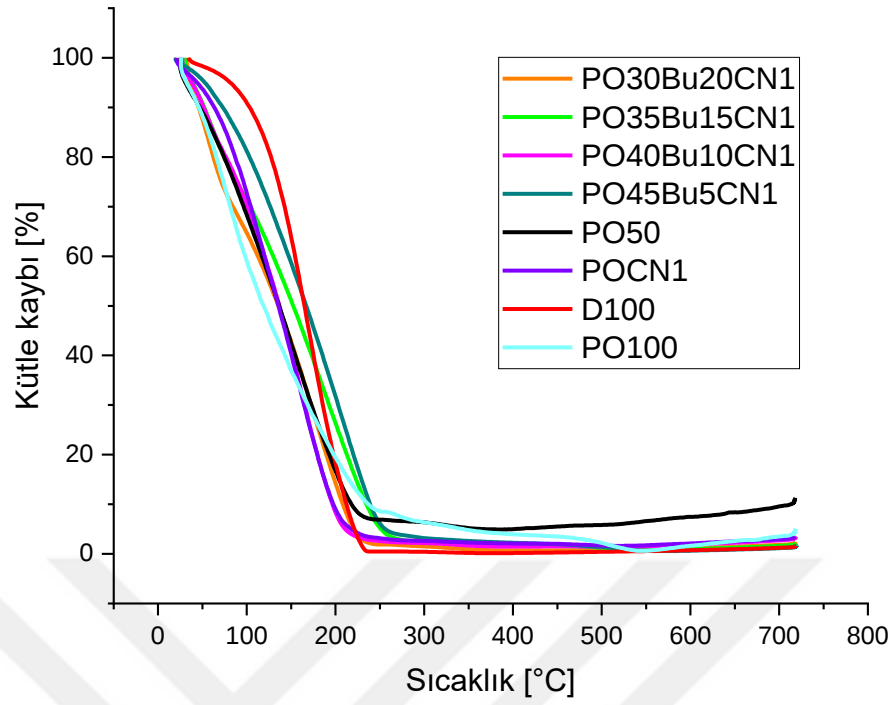
Tablo 8. Ham Pirolitik Yağ ve Karışımlarının Yoğunluklarının Sıcaklıkla Değişimi

	Numune adı	Sıcaklık (°C)						
		10	15	20	25	30	35	40
Yoğunluk (kg/m ³)	D100	840,4	837	833,4	829,9	826,2	822,7	819,2
	PO30Bü20CN1	858,9	855,1	851,3	847,5	843,6	839,9	836,1
	PO35Bü15CN1	862,2	858,3	854,4	850,6	846,8	843	839,2
	PO40Bü10CN1	866,1	862,3	858,5	854,8	851	847,4	843,7
	PO45Bü5CN1	870,4	866,5	862,6	858,7	854,9	851	847,4
	PO50CN1	873,2	869,5	865,9	862,3	858,7	855,1	851,7
	PO50	872,5	868,7	864,9	861	857,5	853,8	850,1

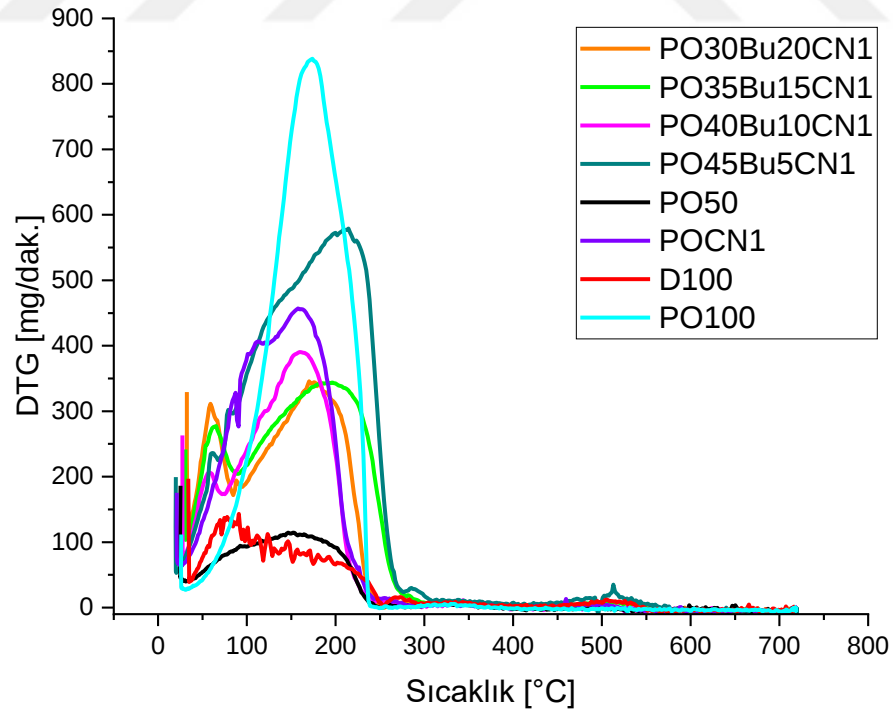
Tablo 8'den elde edilen sonuçlara göre, karışımlardaki ham pirolitik yağ oranındaki artış ve bütanol oranındaki azalmaya bağlı olarak yoğunluklar artmıştır. Ayrıca, sıcaklık artışı ile yoğunluk değerleri azalmaktadır.

TGA Analizi

Ham pirolitik yağ, dizel ve Bütanol karışımlarının termal stabilitesi, 20–750 °C sıcaklık aralığında ve hava ortamında termogravimetrik analiz yapılarak araştırıldı. Termogramları Şekil 7’de gösterilmektedir. TGA analiz tekniği, bir bileşik veya karışımın fiziko-kimyasal özelliklerinin ölçerek, termal ve oksidatif stabilitesini karakterize etmek için kullanılır. Bu özellikler, sıcaklık artışı (°C) ile ağırlık veya % kütlece değişiminin (g veya %) bir fonksiyonu olarak ifade edilir. TGA ve DrTGA termogram grafiklerinden (Şekil 7 ve 8) Ham pirolitik yağ, dizel ve bütanol karışımları için 20–250 °C sıcaklık aralığında tek sürekli bir adımda oksidatif bozulmanın gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Bu sıcaklık aralığında tüm karışımlar için yaklaşık olarak % 96,24–98,97 seviyelerinde bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Tablo 9’da termal bozunmanın başladığı sıcaklıklar ve kütle kayıpları ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 7. PO, D100 ve Bütanol Karışımlarının TGA Analizi (kütle kaybı ve sıcaklığın değişimi)



Şekil 8. PO, D100 ve Bütanol Karışımlarının Derivatif Termogravometrik (DTG) Analizi

Tablo 9. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 Yakıtlarının TGA Sonuçları

Numune adı	Isıtma hızı (°C/dak.)	Sıcaklık aralığı (°C)	Termal bozunma başlangıç sıcaklığı (°C)	Kuru hava şartlarında kütle kaybı (%)
D100	10	34–236	40,33	98,97
PO30Bü20CN1	10	32–220	33,29	97,98
PO35Bü15CN1	10	30-250	31,86	97,94
PO40Bü10CN1	10	27-203	29,71	97,77
PO45Bü5CN1	10	20-252	26,72	98,67
PO50CN1	10	21-213	21,93	98,88
PO50	10	25-210	26,68	96,69
PO100	10	25–257	63.10	98.80
D100	10	26-251	28,71	96,24

DSC Analizi

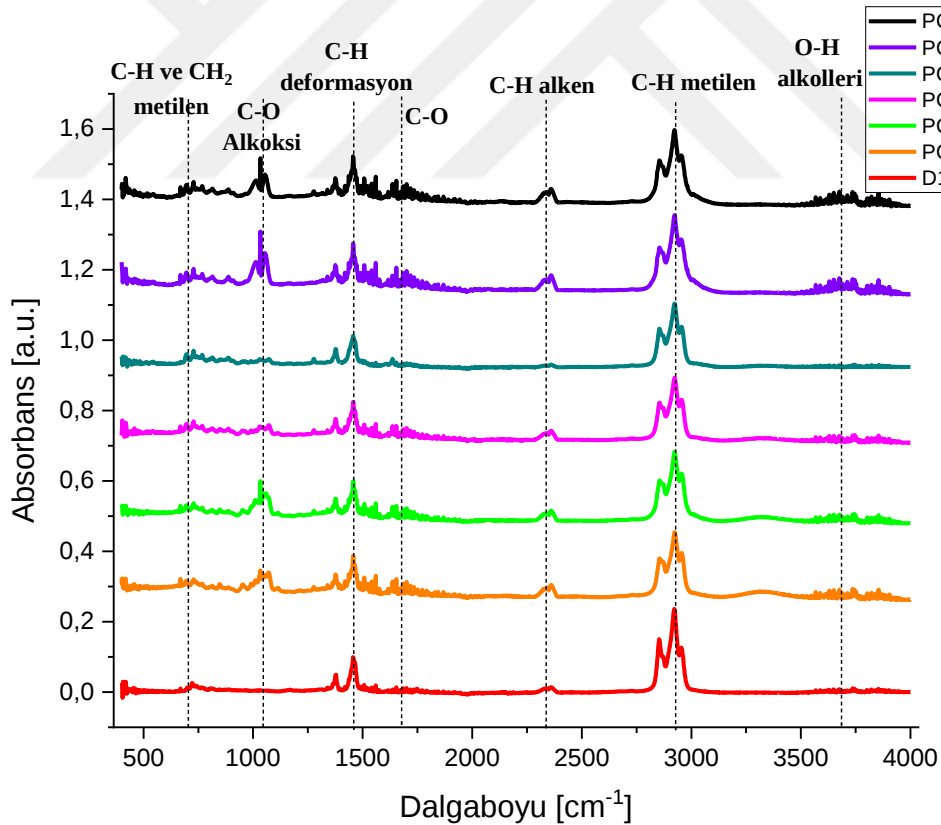
D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 yakıt karışımlarının kristalizasyon sıcaklıklarını tespit edilmiş ve Tablo 10’da sunulmuştur. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 yakıt karışımlarının kristalizasyon sıcaklıklarını sırasıyla are -5,57 °C, -13,61 °C, -12,18 °C, -10,56 °C, -10,53 °C, -11,97 °C, -11,95 °C ve -18,86 °C’dir. Bu bilgiler bize, D100 yakıtına ham pirolitik yağın ve bütanolün karıştırılmasının kristalleşme sıcaklığını daha düşük değerlere kaymasına sebep olduğunu göstermektedir. Enjektör ve yakıt hattındaki olumsuzluklar sebebiyle, daha düşük sıcaklıklarda kristalleşmenin gerçekleştiği yakıtın dizel motorlar için daha uygun olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 10. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 Yakıt Karışımlarının Kristalizasyon Başlangıç Sıcaklıkları

Numune	Kristalizasyon başlangıç sıcaklıkları (°C)
D100	-5,57
PO30Bü20CN1	-13,61
PO35Bü15CN1	-12,18
PO40Bü10CN1	-10,56
PO45Bü5CN1	-10,53
PO50CN1	-11,97
PO50	-11,95
PO100	-18,86

FT-IR Analizi

Ham pirolitik yağ ve karışımlarının yapısını incelemek için FT-IR analizi yapıldı. Tüm numunelere ait FT-IR spekturumları Şekil 9'de gösterilmiştir. Bu spekturumlar incelendiğinde, 3620-3710 cm^{-1} spekturumlarının O-H alkollerini, 3000 cm^{-1} civarındaki piklerin C-H metilen gruplarını, 2620 cm^{-1} 'deki piklerin C-H alken gruplarını, 1670 cm^{-1} civarındaki piklerin C=O bağlarını, 1365-1480 cm^{-1} civarındaki piklerin C-H deformasyonunu, 1100 cm^{-1} civarındaki piklerin C-O alkoksi gruplarını, 745 cm^{-1} 'deki piklerin ise C-H ve CH_2 metilen gruplarının varlığına işaret ettiğini söyleyebiliriz. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 yakıtlarının fonksiyonel grup frekansları Tablo 11'de verilmiştir (Atabani and Kulthoom, 2020; Barot *et al.*, 2017; Coronado *et al.*, 2017). D100 yakıtta 1100 cm^{-1} , 1670 cm^{-1} , 3600 cm^{-1} civarında belirgin spekturumlar gözlemlenmez iken ham pirolitik yağ ve karışımlarında hafif pikler görülmektedir.



Şekil 9. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1 ve PO50 Yakıt Karışımlarının Kızılöztesi Spekturumları (FR-IR)

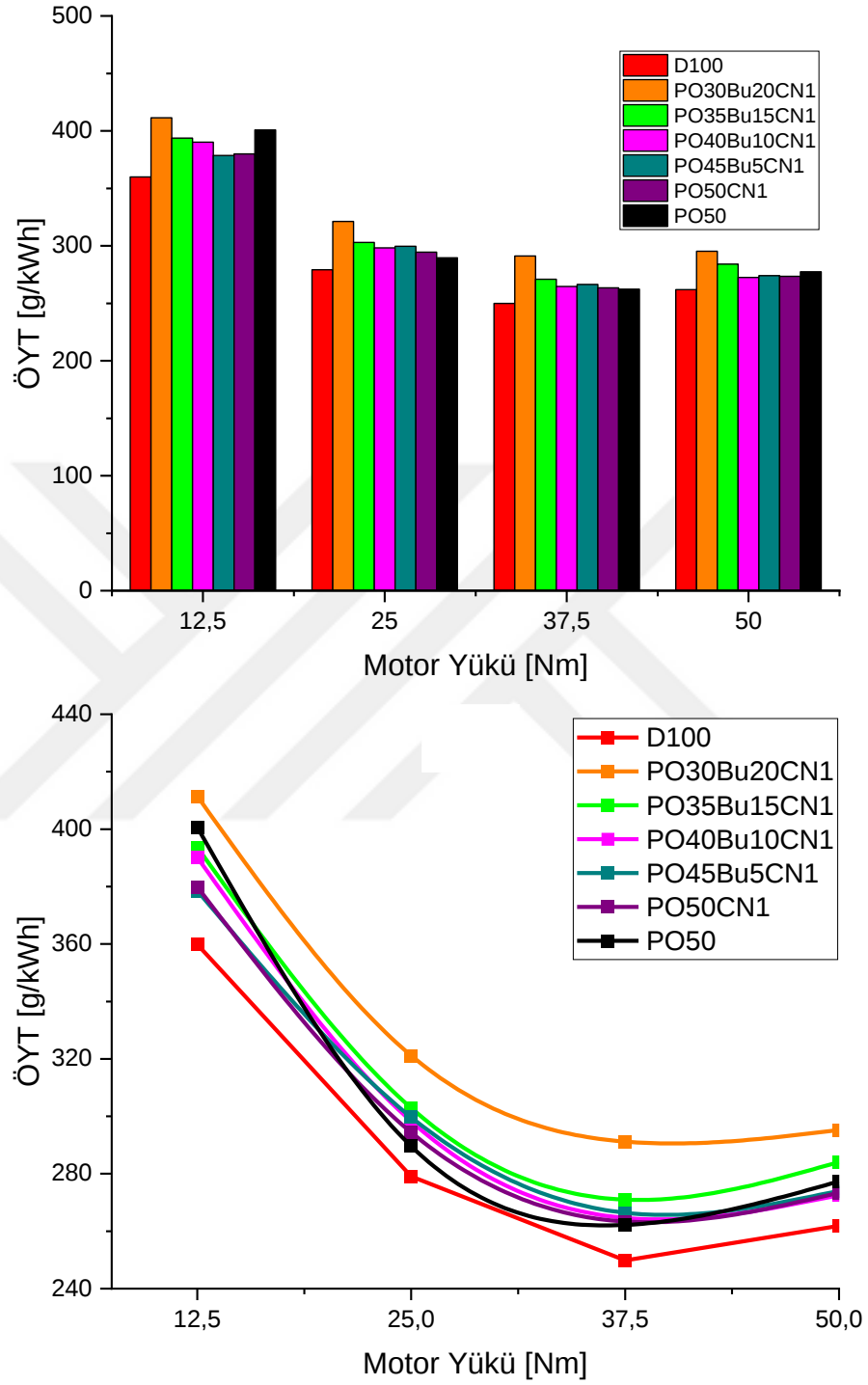
Tablo 11. D100, PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1, PO50CN1, PO50, PO100 ve D100 Yakıtlarının Fonksiyonel Grup Frekansları

Dalgaboyu [cm^{-1}]	Fonksiyonel gruplar ve titreşim tipleri
3000-3300	O-H grupları- Gerilme
2925	C-H alkenleri – Asimetrik gerilme
2589	C-H metilenleri – Simetrik gerilme
1745	C=O esterleri – Gerilme
1380-1460	C-H metilen ve metil grupları- Eğilme
1030-1240	C-O alkoksi esterleri – Gerilme
1195	CC(=O)–O ester bağının eksenel deformasyonu
722	=C-H ve $-(\text{CH}_2)_n$ metilen grupları - Eğilme

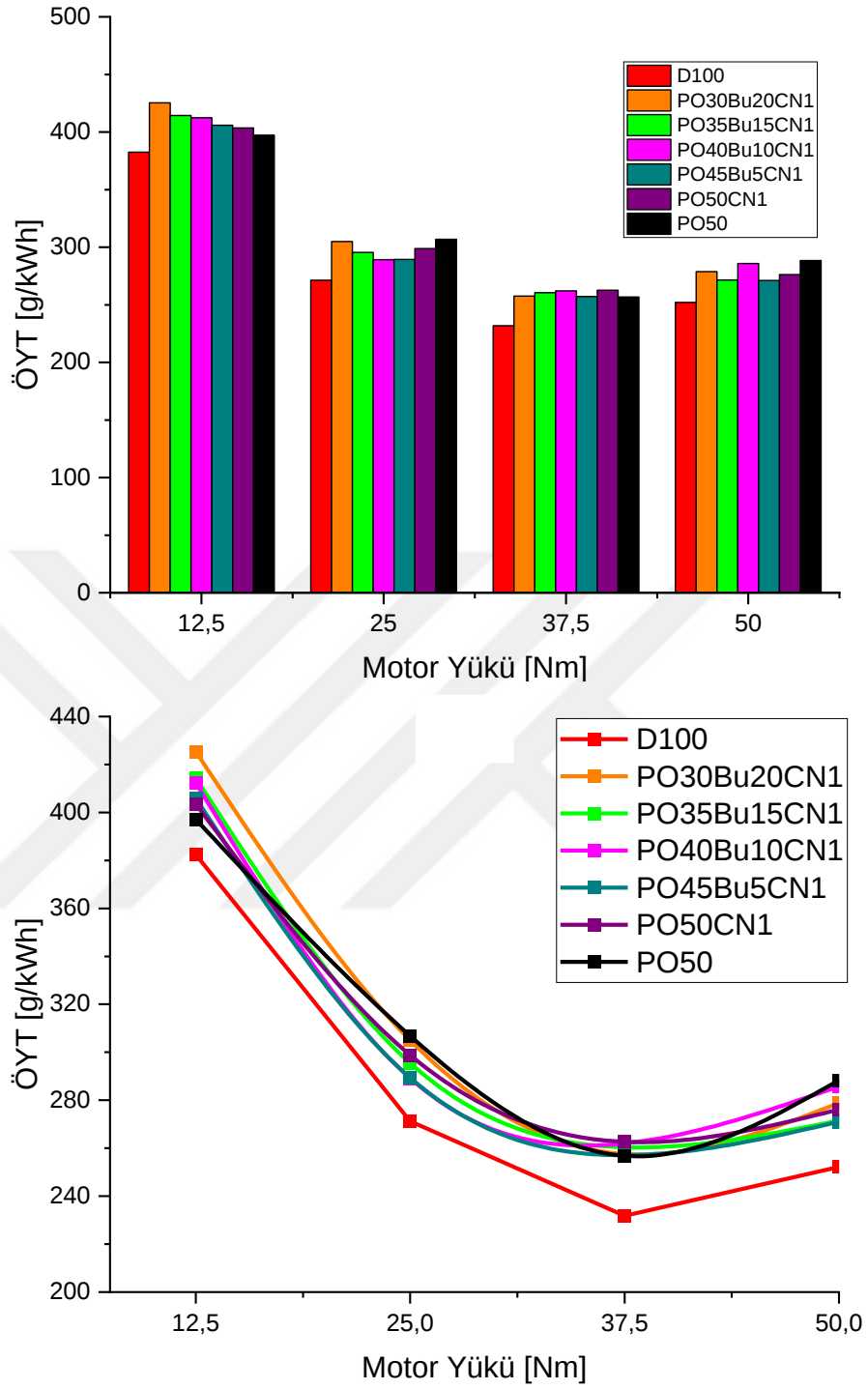
Motor Performans Analizi

Motor deneyleri 3 silindirli, doğal emişli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda yapılmıştır. Deneyler 1500 ve 2000 dev/dak olmak üzere 2 farklı devir sayısında ve 0-12,5-25-37,5-50 Nm olmak üzere 5 farklı motor yükünde yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce motor D100 yakıtı ile motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı 90-100 °C olup kararlı hale gelene kadar çalıştırıldı. Sonrasında her bir numune ile çalışılmaya başlanmadan önce yakıt filtresinde bir önceki deneyden kalan yakıt boşaltılarak, yeni testi yapılacak yakıt filtre içine konuldu. Böylece bir önceki deneyin etkileri azaltılmaya çalışıldı. Motor testlerinde hidrolik dinamometrede dolaşan akışkanın debisi bir vana vasıtasıyla ayarlanarak motorun farklı yüklerde çalışması sağlanmıştır.

Fren Özgöl Yakıt Tüketimi (ÖYT)



Şekil 10. 1500 d/dak'daki Motor Yüğü ile ÖYT'nin Değişimi

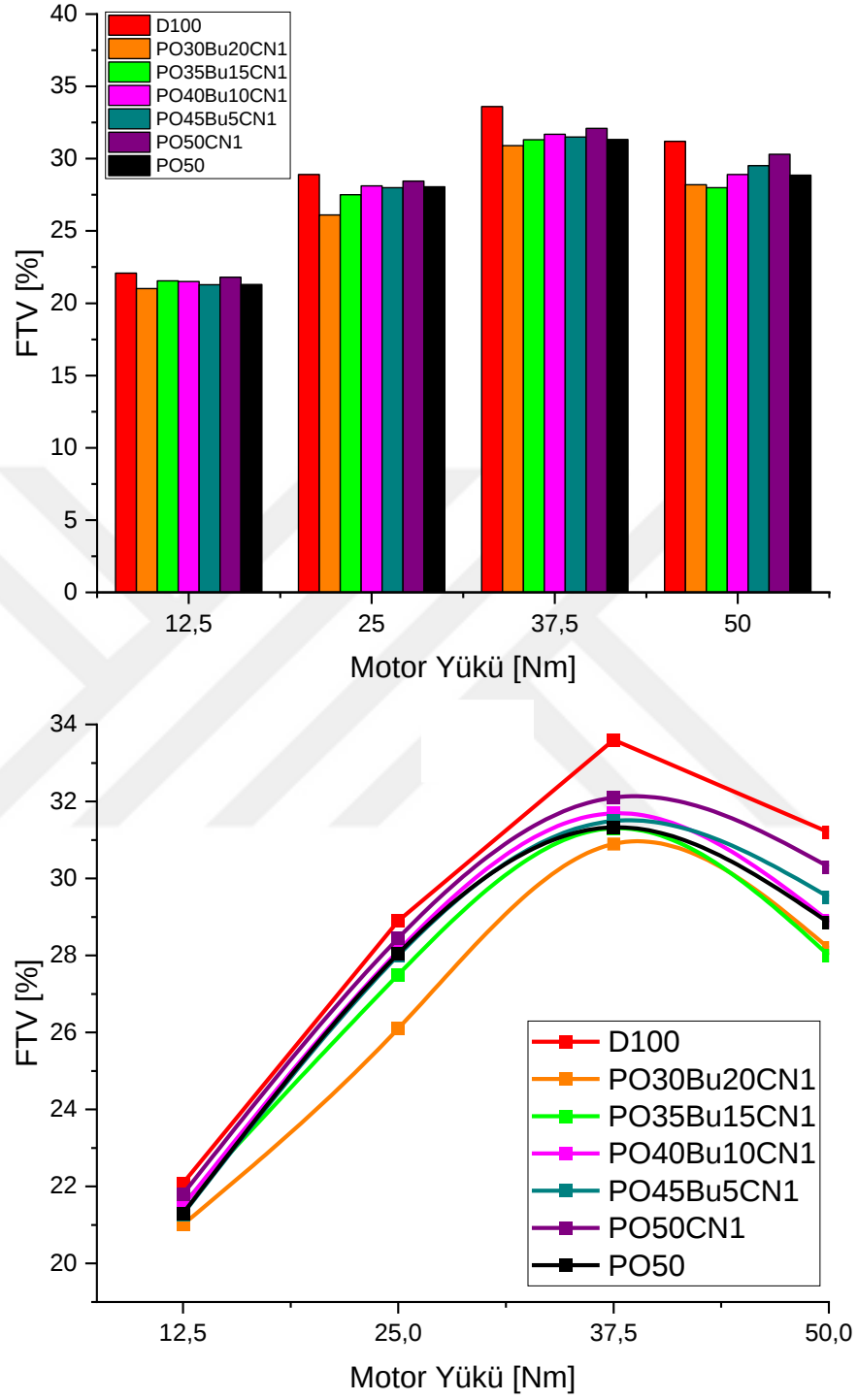


Şekil 11. 2000 d/dak'daki Motor Yüğü ile ÖYT'nin Değişimi

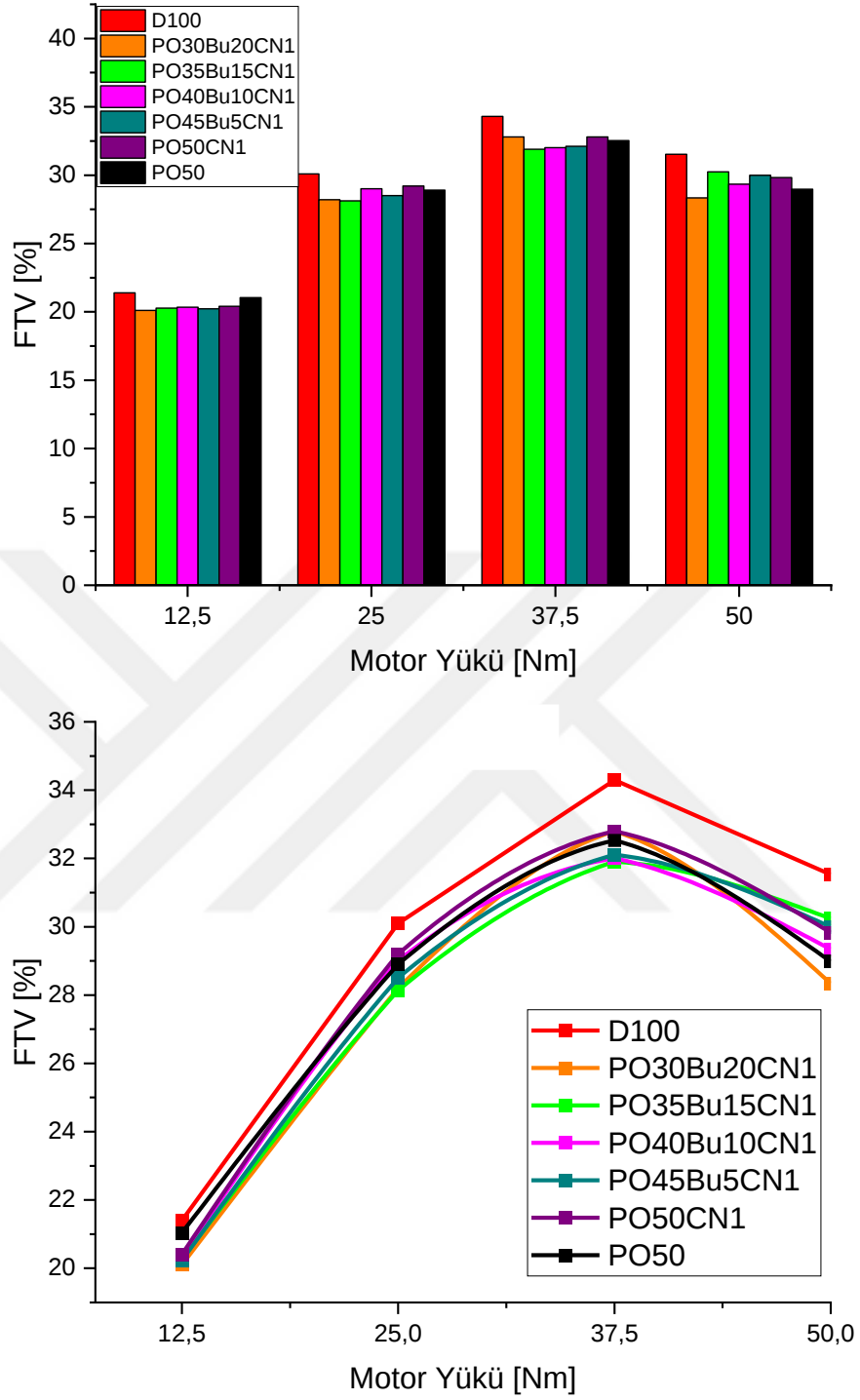
Özgöl yakıt tüketimi içten yanmalı motorlar için en önemli parametrelerden biridir. Birim güç başına yakıt tüketimini gösterir. Böylece, aynı gücü üretmek için tüm yakıtlar tarafından tüketilen yakıt miktarı belirlenmiş olur. Hazırlanan karışımlar için daha düşük ÖYTdeğeri daha anlamlıdır (Emiroğlu and Şen, 2018; Kishore *et al.*, 2021).

Şekil 10 ve 11’de motorun 1500 ve 2000 d/dak devirde 4 farklı yükteki (12,5-25-37,5-50 Nm) özgül yakıt tüketimini göstermektedir. Şekil 10 incelendiğinde, tüm yüklerde en düşük ÖYT değerinin D100 yakıtında gerçekleştiği görülmektedir. D100 yakıtı, tüm yüklerde ortalama olarak diğer yakıtlar mukayese edildiğinde sırasıyla PO30Bü20CN1 yakıtın % 14,63 PO35Bü15CN1 yakıtın % 8,78 PO40Bü10CN1 yakıtının yaklaşık % 6,52 PO45Bü5CN1 yakıtın % 5,92 PO50CN1 yakıtın % 5,26 ve PO50 yakıtın ise % 6,88 daha fazla tükettiği tespit edilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde ise, benzer olarak D100 yakıtın ÖYT’nin en düşük olduğu ve D100 yakıtı tüm yüklerde ortalama olarak diğer yakıtlar mukayese edildiğinde; sırasıyla PO30Bü20CN1 yakıtın % 11,35 PO35Bü15CN1 yakıtın % 9,16 PO40Bü10CN1 yakıtının yaklaşık % 9,82 PO45Bü5CN1 yakıtın % 7,55 PO50CN1 yakıtın % 9,12 ve PO50 yakıtın ise % 9,80 daha fazla tükettiği tespit edilmiştir. 1500 d/dak devir sayısında D100 yakıtından sonraki en az ÖYT değeri POCN1 yakıtında, en yüksek ÖYT değerleri ise PO30Bü20CN1 yakıtında, 2000 d/dak devir sayısında ise D100 yakıtından sonra en düşük ÖYT değeri PO45Bü5CN1 yakıtında, en yüksek ÖYT değeri ise yine PO30Bü20CN1 yakıtında gerçekleşmiştir. Tablo 7’de setan indisinin ve kalorifik değerinin nispeten daha düşük olduğu bütanolün karışımlara ilavesi ile setan indisinin düşerken kalorifik değerin arttığı görülmektedir. Bu durum, aynı gücü elde edebilmek için birim güç başına daha yüksek yakıt tüketimi anlamına gelmektedir. Bu sonuçlar, literatürdeki çalışmalar ile uyumludur (Emiroğlu and Şen, 2018; İlkılıç and Aydın, 2011; Karagöz et al., 2020).

Fren Termal Verimi (FTV)



Şekil 12. 1500 d/dak'deki Motor Fren Termal Veriminin Motor Yüğü ile Değişimi

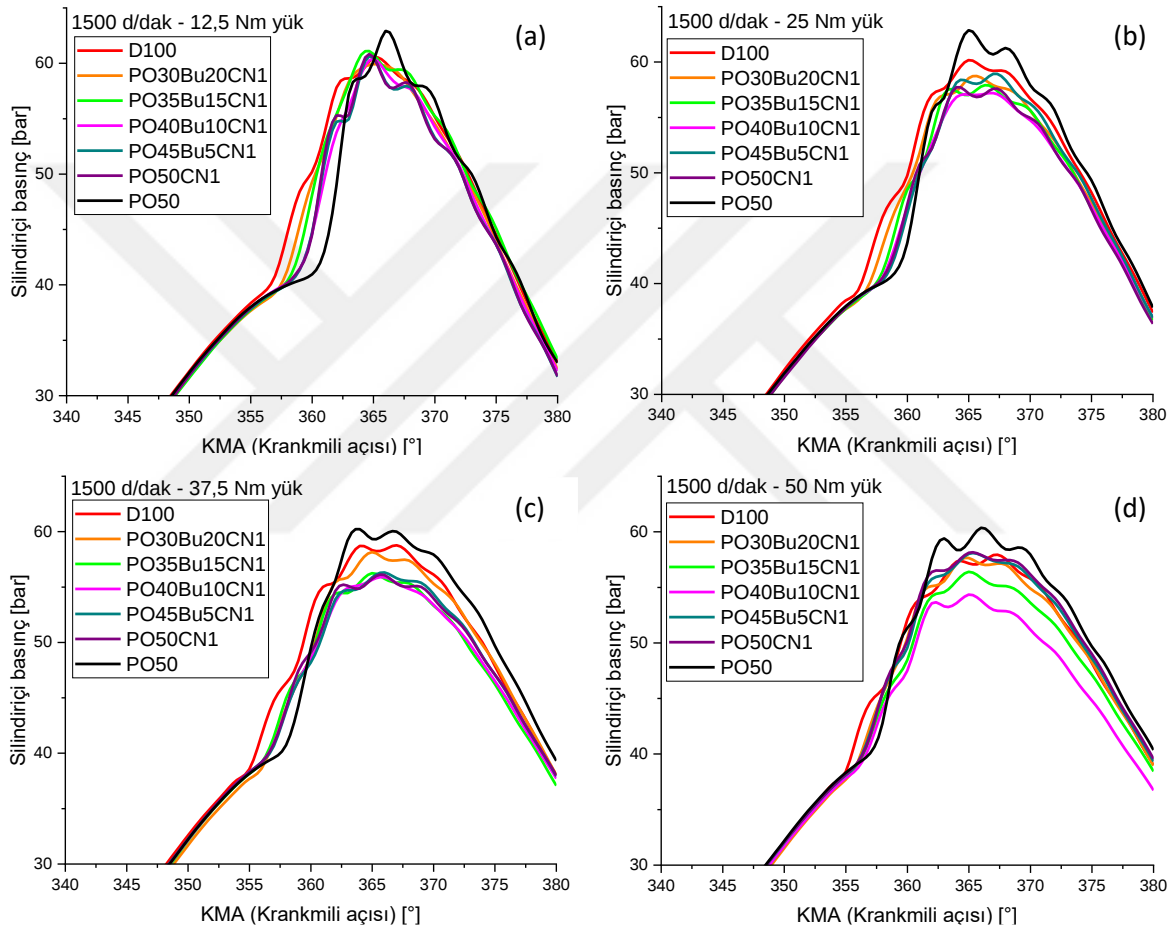


Şekil 13. 2000 d/dak'deki Motor Fren Termal Veriminin Motor Yüğü ile Değişimi

Şekil 12 ve 13'te motorun 1500 ve 2000 d/dak devirde 4 farklı yükteki (12,5-25-37,5-50 Nm) fren termal verimlerinin tüm yakıtlar için değişimi görülmektedir. Şekil 12 ve 13 incelendiğinde, her iki devir sayısında da, tüm yüklerde en yüksek FTV değerinin D100 yakıtında gerçekleştiği görülmektedir. Tüm yük durumları için D100 yakıtına kıyasla ortalama olarak en düşük FTV değerleri 1500 ve 2000 d/dak devir sayıları için sırasıyla %

8,28 ve % 6,72 ile PO30Bu20CN1 yakıtında gerçekleşmiştir. Ayrıca, D100 yakıtı en yakın FTVdeğeri ise ortalama olarak 1500 ve 2000 d/dak devir sayıları için sırasıyla D100 yakıttan % 2,71 ve % 4,33'lük farklarla PO50CN1 yakıtında meydana gelmiştir. Bu durum, hazırlanan karışımların içerisinde D100 yakıtı nazaran daha düşük setan indisi ve kalorifik değere sahip ham pirolitik yağ ve bütanol bulunmasının termal verimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir.

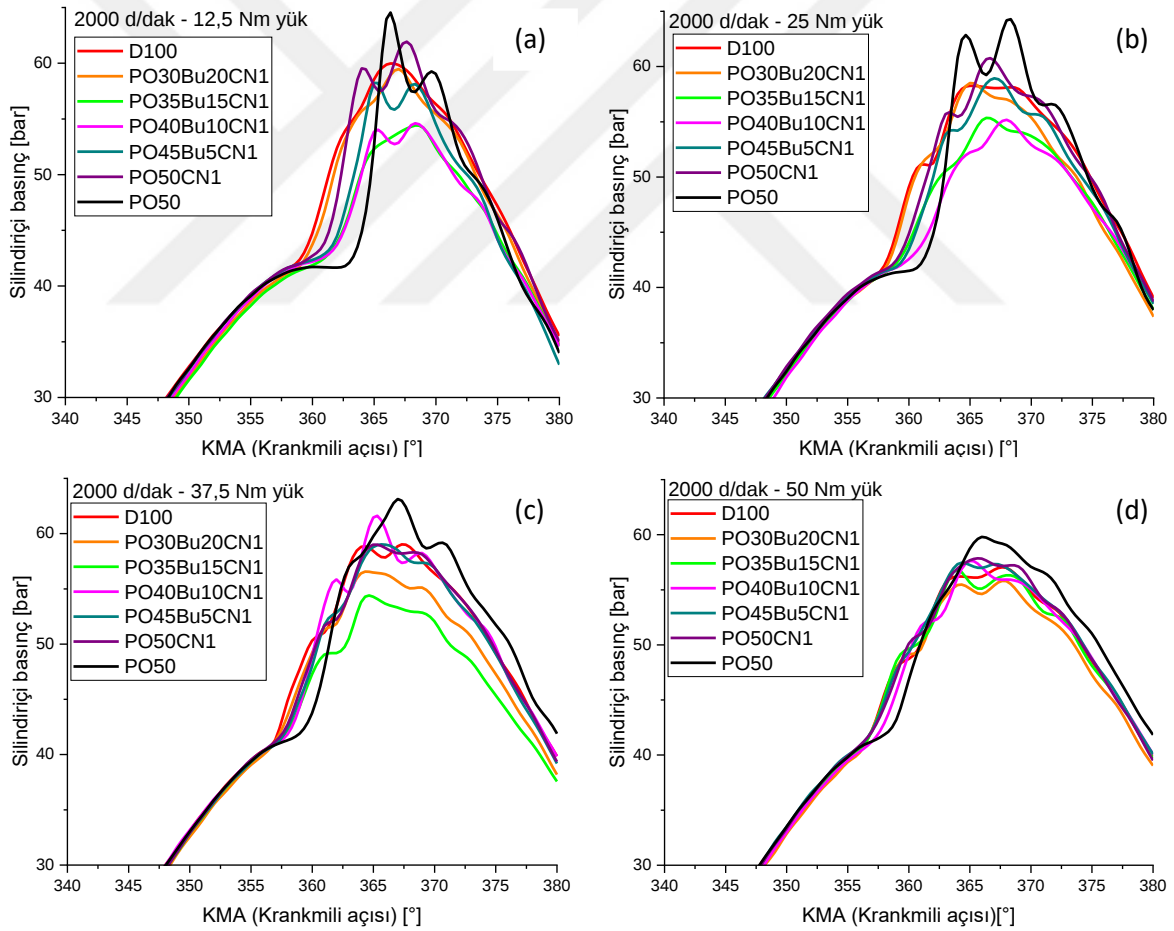
Silindir İçi Basınç Verileri



Şekil 14. 1500 d/dak'da (a) 12,5 Nm, (b) 25 Nm, (c) 37,5 Nm ve (d) 50 Nm Yük'te Krank Mili Açısına Göre Silindir İçi Basınçların Değişimi

Şekil 14'de 1500 d/dak devir sayısında sırasıyla 12,5 – 25 – 37,5 ve 50 Nm yükte silindir içi basıncın değişimi görülmektedir. Şekil 14-a'da silindir içinde P_{max} PO50 yakıtında gerçekleşmiştir. PO50 yakıtın setan indisi diğer yakıt karışımlarına nazaran düşük olduğu için püskürtme başlangıcı üst ölü noktadan yaklaşık 16 KMA yapıldığı anda tutuşmaya başlamamış ve 5-6 KMA yanmadan silindir içine püskürtülmüştür. Daha sonrasında PO50

yakıtı ani olarak yandığında P_{max} değerine ulaşılmıştır. Bu durum setan indisinin düşük olduğu yakıtlar için tutuşma gecikmesi süresinin silindir içinde kontrolsüz bir şekilde basıncın artmasına sebep olması olarak açıklanabilir (Karagöz et al., 2020; Kumar *et al.*, 2006). Ayrıca, tüm karışımlar için $dP/d\alpha$ değeri incelendiğinde, yakıtın püskürtüldüğü andan yanmaya başladığı ana kadar $dP/d\alpha$ eğiminin en yüksek olduğu yakıtın D100 yakıtı, en düşük eğimin ise PO50 yakıtın olduğu söylenebilir. $dP/d\alpha$ değerleri D100 yakıtından sonra sırasıyla PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1 ve PO50CN1 olacak şekilde sıralanmaktadır. Bu durum tüm yükler için benzerlik göstermektedir. PO50 yakıtın D100 yakıtı kıyasla silindir içinde oluşan P_{max} değerleri, 12,5 – 25 – 37,5 ve 50 Nm yüklerde sırasıyla % 4,02 - % 4,49 - % 2,48 ve % 4.23 olarak gerçekleşmiştir.

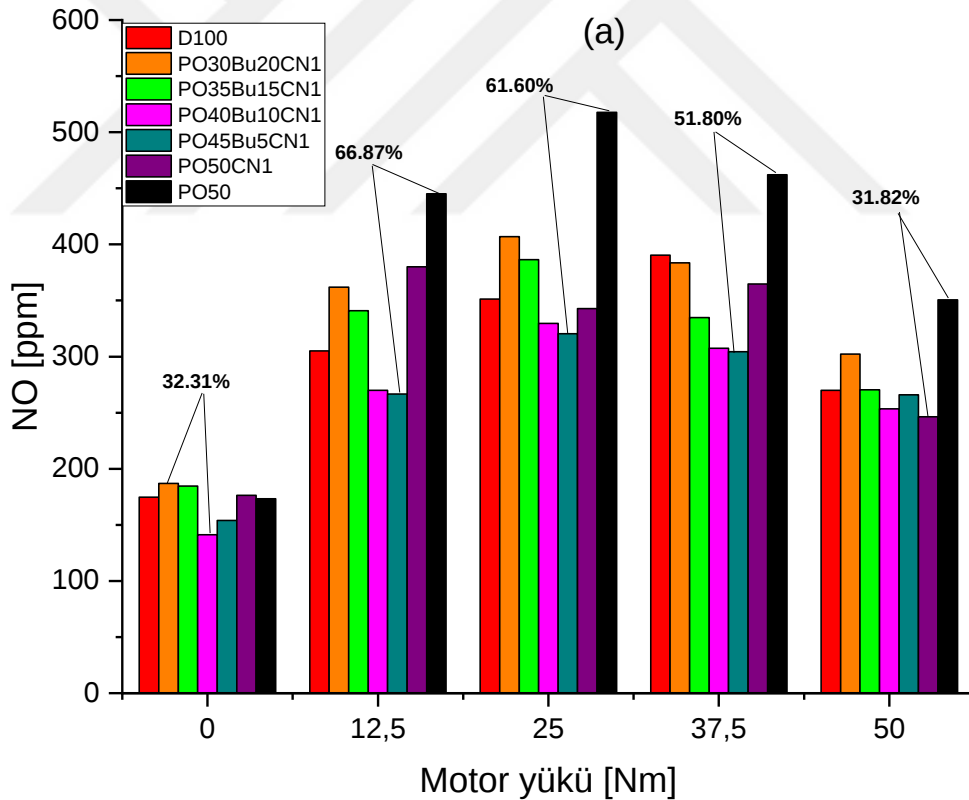


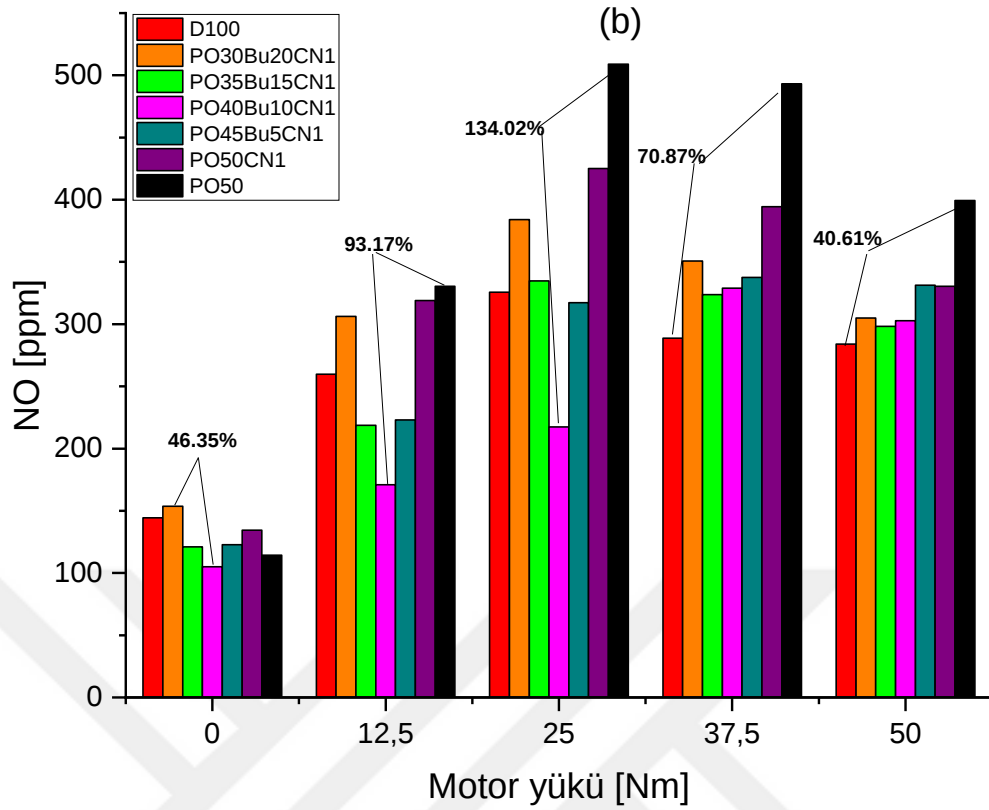
Şekil 15. 2000 d/dak'da (a) 12,5 Nm, (b) 25 Nm, (c) 37,5 Nm ve (d) 50 Nm Yük'te Krank Mili Açısına Göre Silindir İçi Basınçların Değişimi

Şekil 15’de 2000 d/dak devir sayısında sırasıyla 12,5 – 25 – 37,5 ve 50 Nm yükte silindir içi basıncın değişimi görülmektedir. 1500 d/dak devir sayısında değişimlere benzer olarak, 2000 d/dak ve tüm yüklerde silindir içindeki P_{max} değeri PO50 yakıtında gerçekleşmiştir. Bu durum da, PO50 yakıtın setan indisinin düşük olması ve tutuşma gecikmesi süresinin daha uzun sürmesi sonucu kontrolsüz yanmanın gerçekleşmesi ve basıncı aniden artması olarak açıklanabilir. Ayrıca, P_{max} ile P_{min} değerleri 12,5 ve 25 Nm yük için PO50 ve PO40Bü10CN1 karışımlarında, 37,5 Nm yük için PO50 ve PO35Bü15CN1, 50 Nm yük için ise PO50 ve PO30Bü20CN1 karışımlarında gerçekleşmiştir. Bu durum, yük artışı ile P_{min} değerinin karışım içerisindeki PO yüzdesinin azaldığı Bütanol yüzdesinin arttığı yakıtlara kaymasına sebep olmuştur.

Emisyon analizi

NO_x emisyonu



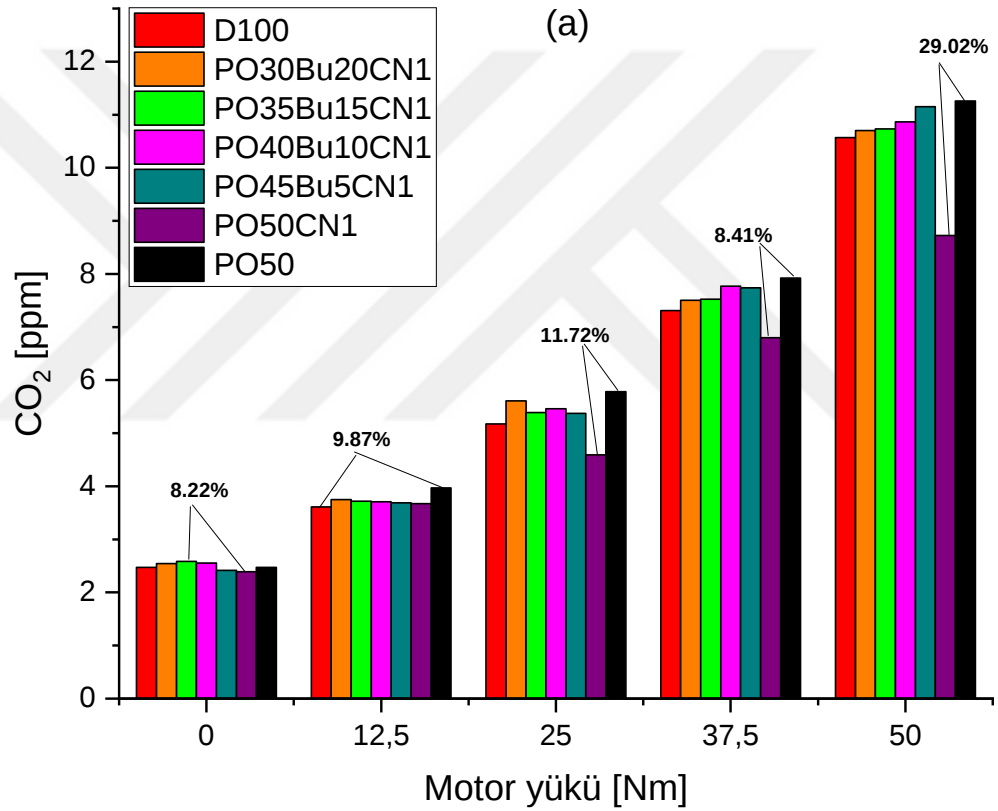


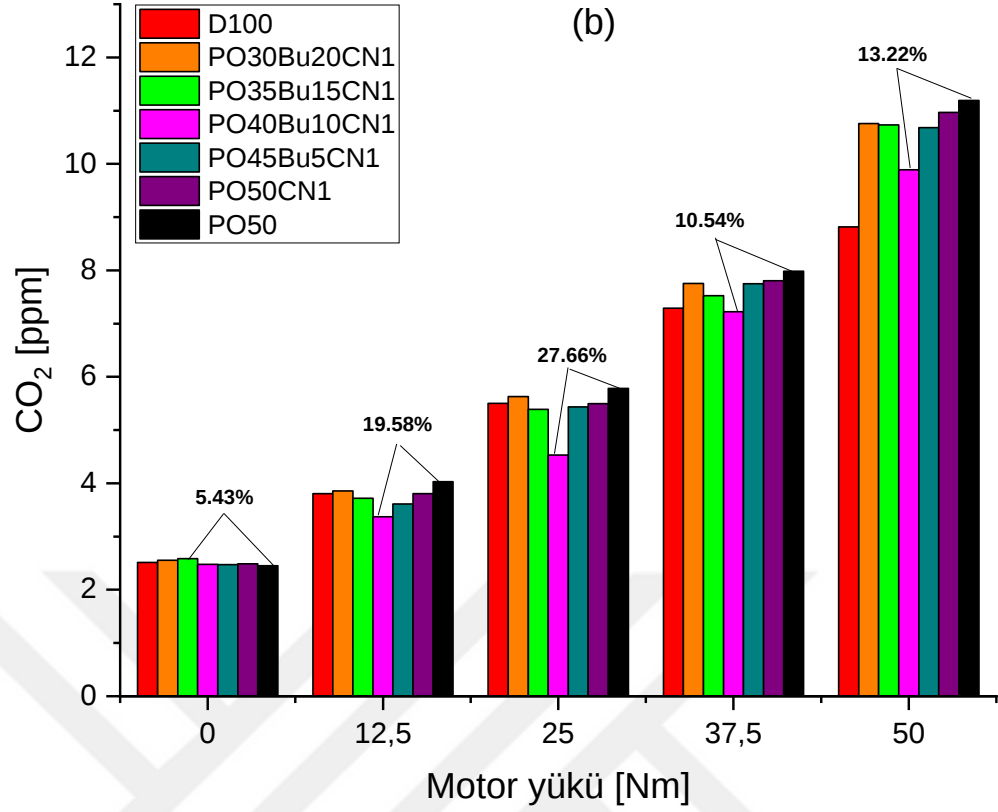
Şekil 16. Farklı Test Yakıtları ve Yüklere Göre NO_x Emisyonlarının Değişimi a) 1500 d/dak
b) 2000 d/dak

Şekil 16'da 1500 ve 2000 d/dak değerlerinde tüm yükler için NO_x emisyonlarının değişimi görülmektedir. Yanma stokiyometrisinde NO_x oluşumunun ana sebebi yanma sonu sıcaklığı ve yüksek O₂ konsantrasyonudur (Ceviz *et al.*, 2012; Emiroğlu and Şen, 2018; Kalargaris *et al.*, 2017; Mourad *et al.*, 2021). Yanma işleminde, emme zamanında silindire alınan atmosferdeki N₂, NO_x oluşumunun ana kaynağıdır. Yanma sırasında, O₂ ve N₂ atomları yüksek sıcaklıkta reaksiyona girerek NO_x oluşturur. Bu mekanizma Zeldovich mekanizması olarak bilinir (Benjumea *et al.*, 2011; Ruhul *et al.*, 2017). Şekil 16-a'da 0 Nm yükte en yüksek NO_x oluşumu PO30Bü20CN1 karışımında, en düşük NO_x oluşumu ise PO40Bü10CN1 yakıtında gerçekleştirmiştir. Diğer tüm karışımlarda en yüksek NO_x oluşumu PO50 yakıtında gözlemlenmiştir. PO yüzdesi artarken bütanol yüzdesi azalan PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1 ve PO45Bü5CN1 yakıtlarında, tüm yük durumları için D100 yakıtı mukayese edildiğinde bir miktar artış olmuş sonrasında kademeli olarak bir azalma görülmüştür. Sonrasında PO50CN1 yakıtı ile NO_x emisyonlarında bir artış olmuş ve PO50 yakıtı ile maksimum değere ulaşmıştır. NO_x değişimlerinde en büyük fark 12,5 Nm yükte % 66,87'lik değişimle PO45Bü5CN1 yakıtı ile PO50 yakıtı arasında gerçekleşmiştir. Şekil 16-b

incelendiğinde, karışımlardaki PO yüzdesi arttıkça ve bütanol yüzdesi azaldıkça NO_x emisyonlarının azaldığı, PO40Bü10CN1 karışımına kadar, düşük setan indisine sahip bütanolün varlığı ile NO_x emisyonları azalmakta olup, % 10 bütanol katkı oranından sonra silindir içerisindeki ani basınç ve sıcaklık artışına bağlı olarak NO_x emisyonları artmaktadır. NO_x emisyonlarındaki en büyük değişim 25 Nm yükte PO40Bü10CN1 ile PO50 yakıtları arasında % 134,02 oranıyla gerçekleşmiştir. Ayrıca, tüm karışımlara setan sayısı iyileştirici katılmasının NO_x emisyonlarında büyük farklar meydana getirdiği kolaylıkla söylenebilir.

CO₂ emisyonu





Şekil 17. Farklı Test Yakıtları ve Yüklere Göre CO₂ Emisyonlarının Değişimi a) 1500 d/dak
b) 2000 d/dak

CO₂ emisyonu, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarından biridir (Thiyagarajan *et al.*, 2019). CO₂ emisyonları düzensiz emisyonlardır ve doğrudan yakıtların veya maddelerin karbon içeriği ile ilgilidir (EdwinGeo *et al.*, 2021). Yakıtın yanma odasında yanması egzozda CO₂ emisyonuna neden olur. Yakıtın hava ile tam yanması ne kadar yüksek olursa, CO₂ emisyonları da o kadar yüksek olur. Yanma ürünlerinde CO bulunması yanmanın tamamlanmadığını ve silindir içerisinde yeterli O₂ olmadığını gösterir (Ruhul *et al.*, 2017).

Şekil 17’de 1500 ve 2000 d/dak devir sayılarında 5 farklı yükte CO₂ emisyonlarının değişimlerini göstermektedir. Şekil 17-a’da 0 Nm yük hariç tüm yüklerde en yüksek CO₂ salınımı PO50 yakıtında görülmüştür. Yük arttıkça en yüksek ve en düşük CO₂ salınımları arasındaki fark ta artmıştır. Ayrıca, tüm karışımlara setan sayısı iyileştirici katılmasının CO₂ emisyonlarında ciddi bir fark oluşturduğu söylenebilir. 25 - 37,5 ve 50 Nm yüklerde POCN1 ve PO50 yakıtlarının CO₂ emisyonları arasında sırasıyla % 11,72 - % 8,41 ve % 29,02’lik bir fark oluşmuştur. Şekil 17-b’de ise 0 Nm yük hariç tüm yüklerde en yüksek CO₂ salınımı PO50 yakıtında, en düşük CO₂ salınımı ise PO40Bü10CN1 yakıtında gerçekleşmiştir. Maksimum ve minimum CO₂ emisyonları arasındaki en yüksek fark 25 Nm yükte % 27,66

oranında gerçekleşmiştir. Karışımıldaki PO konsantrasyonu artttıka, emisyonlardaki oksijen içeriği azalmıştır. Bu sebeple en düşük CO₂ salınımı PO50CN1 yakıtında görölmüşür.



SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, atık lastiklerden elde edilen ham pirolitik yağ ve bütanol dizel yakıta karıştırılarak 7 farklı yakıt numunesi hazırlanmıştır. Tüm yakıt karışımları, 1500 ve 2000 d/dak 2 farklı devir sayısında ve 5 farklı yükte (0 – 12,5 – 25 – 37,5 ve 50 Nm) 3 silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda testlere tabii tutulmuşlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. Tüm dizel yakıt, ham pirolitik yağ ve bütanol karışımları, dizel motorda herhangi bir modifikasyona gerek olmaksızın kullanılabilir.
2. Tüm deneylerde vuruntu sınırına yaklaşılmamıştır.
3. ÖYT değeri karışımlardaki PO yüzdesi arttıkça ve bütanol yüzdesi azaldıkça azalma göstermiştir. En yüksek ÖYT değeri PO30Bü20CN1 yakıtında, en düşük BSFC değeri ise D100 yakıtında görülmüştür.
4. FTV değeri her iki devir sayısında da en yüksek D100 yakıtında görülmüştür. En düşük FTV değerleri 1500 ve 2000 d/dak devir sayıları için sırasıyla % 8,28 ve % 6,72 ile PO30Bü20CN1 yakıtında gerçekleşmiştir.
5. Silindir içi basınç verilerinde P_{max} değeri her iki devir sayısında da PO50 yakıtında meydana gelmiştir. Basınç artış hızı $dP/d\alpha$ D100 yakıtından sonra PO30Bü20CN1, PO35Bü15CN1, PO40Bü10CN1, PO45Bü5CN1 ve PO50CN1 olacak şekilde gerçekleşmiştir.
6. Karışımlardaki PO yüzdesi arttıkça ve Bütanol yüzdesi azaldıkça NO_x emisyonlarının azaldığı görülmüştür. PO40Bü10CN1 karışımına kadar, düşük setan indisine sahip bütanolün varlığı ile NO_x emisyonları azalmış olup, % 10 bütanol katkı oranından sonra silindir içerisindeki ani basınç ve sıcaklık artışına bağlı olarak NO_x emisyonları artmıştır.
7. En yüksek CO_2 salınımı PO50 yakıtında, en düşük CO_2 salınımı ise PO40Bü10CN1 yakıtında 25 Nm yükte % 27,66 olarak gerçekleşmiştir.

Öneriler

İleriki çalışmalar için aşağıdaki hususların dikkate alınmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

1. Atık lastiklerden elde edilen HPY farklı kimyasallarla reaksiyona sokulduktan sonra, destilasyon işlemine tutularak ağır hidrokarbonlardan uzaklaştırılabilir.
2. Setan sayısı iyileştirici oranı değiştirilerek deneyler tekrarlanabilir.
3. Karışımlara alkol olarak bütanol yerine, propanol ve etanol ilave edilerek deneyler tekrarlanabilir.
4. Ayrıca, ham pirolitik yağ benzin yakıtı ve bir alkol (etanol, propanol v.b.) ile karıştırılarak elde edilen numunelerin buji ateşlemeli bir motorda, motor performansı ve egzoz emisyonları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Albayrak, S., 2014. Biyodizelin Tek Silindirli Bir Dizel Motorun Performans, Emisyon Ve Titreşimlerine Olan Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altunbaş, O., 2016. Peleminir bitkisinin pirolizi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arı, O., 2018. İş makinelerinde hasar analizi ve önlemi.
- Atabani, A. and Kulthoom, S. A., 2020. Spectral, thermoanalytical characterizations, properties, engine and emission performance of complementary biodiesel-diesel-pentanol/octanol blends. *Fuel*, 282 118849.
- Atabani, A., Mekaoussi, M., Uguz, G., Arpa, O., Ayanoglu, A. and Shobana, S., 2020. Evaluation, characterization, and engine performance of complementary fuel blends of butanol–biodiesel–diesel from Aleurites moluccanus as potential alternative fuels for CI engines. *Energy & Environment*, 31 (5), 755-784.
- Athar, T., 2015. Smart precursors for smart nanoparticles. In *Emerging Nanotechnologies for Manufacturing* (pp. 444-538): Elsevier.
- Barbooti, M. M., Mohamed, T. J., Hussain, A. A. and Abas, F. O., 2004. Optimization of pyrolysis conditions of scrap tires under inert gas atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72 (1), 165-170.
- Barot, S., Bandyopadhyay, R. and Joshi, S. S., 2017. Catalytic conversion of Jatropha Oil to biofuel over titania, zirconia, and ceria loaded amorphous alumino-silicate catalysts. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36 (3), 749-757.
- Batır, B., 2002. Türkiye İçin Kullanılmış Lastik Yönetimi Araştırması, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Benjumea, P., Agudelo, J. R. and Agudelo, A. F., 2011. Effect of the degree of unsaturation of biodiesel fuels on engine performance, combustion characteristics, and emissions. *Energy & Fuels*, 25 (1), 77-85.
- Borgund, A. E. and Barth, T., 1999. Effects of base catalysis on the product distribution from pyrolysis of woody biomass in the presence of water. *Organic geochemistry*, 30 (12), 1517-1526.
- Bosch, R., 2007. Automotive handbook. In *Plochingen* (pp. 313-314).
- Boxiong, S., Chunfei, W., Binbin, G. and Rui, W., 2007. Pyrolysis of waste tyres with zeolite USY and ZSM-5 catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 73 (1-2), 150-157.
- Bridgwater, T., 2006. Biomass for energy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86 (12), 1755-1768.
- Ceviz, M. A., Sen, A. K., Küleri, A. K. and Öner, İ. V., 2012. Engine performance, exhaust emissions, and cyclic variations in a lean-burn SI engine fueled by gasoline–hydrogen blends. *Applied Thermal Engineering*, 36 314-324.
- Chrzanowski, W. and Dehghani, F., 2013. Standardised chemical analysis and testing of biomaterials. In *Standardisation in Cell and Tissue Engineering* (pp. 166-197a): Elsevier.
- Coronado, M. A., Montero, G., García, C., Valdez, B., Ayala, R. and Pérez, A., 2017. Quality Assessment of Biodiesel Blends Proposed by the New Mexican Policy Framework. *Energies*, 10 (5), 631.

- Çelik, O., 2019. Atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın reaktivite kontrollü sıkıştırma ateşlemeli motorlarda kullanımının deneysel olarak araştırılması, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi.
- Çoştur, R., 2019. Pirolize edilmiş lastik yağı ve katkı maddesi kullanılarak elde edilen yakıtın tek silindirli dizel motor performans ve emisyonlara etkisi, Yüksek lisans tezi,
- Doğan, O., 2012. Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması.
- Doğan, O., Çelik, M. B. and Özdalyan, B., 2012. The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 95 340-346.
- Dos Santos, R. G., Rocha, C. L., Felipe, F. L. S., Cezario, F. T., Correia, P. J. and Rezaei-Gomari, S., 2020. Tire waste management: an overview from chemical compounding to the pyrolysis-derived fuels. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22 (3), 628-641.
- EdwinGeo, V., Fol, G., Aloui, F., Thiagarajan, S., Stanley, M. J., Sonthalia, A., Brindhadevi, K. and Saravanan, C., 2021. Experimental analysis to reduce CO₂ and other emissions of CRDI CI engine using low viscous biofuels. *Fuel*, 283 118829.
- Emiroğlu, A. O. and Şen, M., 2018. Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133 371-380.
- Groenewoud, W. M., 2001. Characterisation of polymers by thermal analysis. In: Elsevier.
- İlkılıç, C. and Aydın, H., 2011. Fuel production from waste vehicle tires by catalytic pyrolysis and its application in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 92 (5), 1129-1135.
- Islam, M. R., Tushar, M. and Haniu, H., 2008. Production of liquid fuels and chemicals from pyrolysis of Bangladeshi bicycle/rickshaw tire wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82 (1), 96-109.
- Kalargaris, I., Tian, G. and Gu, S., 2017. Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 157 108-115.
- Karagoz, M., Uysal, C., Agbulut, U. and Saridemir, S., 2020. Energy, exergy, economic and sustainability assessments of a compression ignition diesel engine fueled with tire pyrolytic oil– diesel blends. *Journal of Cleaner Production*, 264 121724.
- Karagöz, M., Ağbulut, Ü. and Saridemir, S., 2020. Waste to energy: Production of waste tire pyrolysis oil and comprehensive analysis of its usability in diesel engines. *Fuel*, 275 117844.
- Kishore, C., Singh, Y. and Negi, P., 2021. Comparative performance analysis on the DI diesel engine running on Karanja Kusum and Mahua methyl esters. *Materials Today: Proceedings*, 46 10496-10502.
- Kondor, I. P., Zöldy, M. and Mihály, D., 2021. Experimental Investigation on the Performance and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine Using Waste-Based Tire Pyrolysis Fuel and Diesel Fuel Blends. *Energies*, 14 (23), 7903.
- Krieger, R., 1966. The computation of apparent heat release for internal combustion engines. ASME Paper 66-WA/DGP-4.
- Kumar, M. S., Kerihuel, A., Bellettre, J. and Tazerout, M., 2006. Ethanol animal fat emulsions as a diesel engine fuel–part 2: engine test analysis. *Fuel*, 85 (17-18), 2646-2652.
- Martinez-Martinez, S., Sanchez-Cruz, F., Riesco-Avila, J., Gallegos-Munoz, A. and Aceves, S., 2008. Liquid penetration length in direct diesel fuel injection. *Applied Thermal Engineering*, 28 (14-15), 1756-1762.

- Mikulski, M., Ambrosewicz-Walacik, M., Duda, K. and Hunicz, J., 2020. Performance and emission characterization of a common-rail compression-ignition engine fuelled with ternary mixtures of rapeseed oil, pyrolytic oil and diesel. *Renewable Energy*, 148 739-755.
- Mikulski, M., Ambrosewicz-Walacik, M., Hunicz, J. and Nitkiewicz, S., 2021. Combustion engine applications of waste tyre pyrolytic oil. *Progress in Energy and Combustion Science*, 85 100915.
- Minkova, V., Razvigorova, M., Gergova, K., Goranova, M., Ljutzkanov, L. and Angelova, G., 1992. Effect of water vapour on the pyrolysis of solid fuels: 2. Effect of water vapour during the pyrolysis of solid fuels on the formation of the porous structure of semicoke. *Fuel*, 71 (3), 263-265.
- Mohammed, M., Atabani, A., Uguz, G., Lay, C.-H., Kumar, G. and Al-Samaraae, R., 2020. Characterization of hemp (*Cannabis sativa* L.) biodiesel blends with euro diesel, butanol and diethyl ether using FT-IR, UV-Vis, TGA and DSC techniques. *Waste and Biomass Valorization*, 11 (3), 1097-1113.
- Mourad, M., Mahmoud, K. R. and NourEldeen, E.-S. H., 2021. Improving diesel engine performance and emissions characteristics fuelled with biodiesel. *Fuel*, 302 121097.
- Murugan, S., Ramaswamy, M. and Nagarajan, G., 2008. Performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using Distilled Tyre pyrolysis oil-diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 89 (2), 152-159.
- Oh, S.-K., Baik, D.-S. and Han, Y., 2003. Emission characteristics in ultra low sulfur diesel. *International Journal of Automotive Technology*, 4 (2), 95-100.
- Öcal, M., 2006. Setan sayısı hakkında 6 soru. *Mühendis ve Makine*, 48 (568), 24-25.
- Özden, M., 1990. Lastik sektöründe pazarlama faaliyetlerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Pangaliyev, Y., 2014a. Ömrünü tamamlamış lastiklerden piroliz/gazlaştırma ile değerlendirilebilir ürün eldesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi.
- Pangaliyev, Y., 2014b. Ömrünü tamamlamış lastiklerden piroliz/gazlaştırma ile değerlendirilebilir ürün eldesi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Parker, G., 2001. *Encyclopedia of materials: science and technology*.
- Prusty, K., Barik, S. and Swain, S. K., 2019. A corelation between the graphene surface area, functional groups, defects, and porosity on the performance of the nanocomposites. In *Functionalized Graphene Nanocomposites and their Derivatives* (pp. 265-283): Elsevier.
- Rahman, A., Akmal, M. and Prasad, K., 2001. Pyrolysis of solid wastes.
- Revelo, C. F., Correa, M., Aguilar, C. and Colorado, H. A., 2019. Waste tire rubber powders based composite materials. In *REWAS 2019* (pp. 437-445): Springer.
- Ruhul, A., Kalam, M., Masjuki, H., Shahir, S., Alabdulkarem, A., Teoh, Y., How, H. and Reham, S., 2017. Evaluating combustion, performance and emission characteristics of *Millettia pinnata* and *Croton megalocarpus* biodiesel blends in a diesel engine. *Energy*, 141 2362-2376.
- Sadıkoğlu, H. Ö., 2014. Arıtma çamurlarının pirolizinde uçucu metal bileşiklerin kontrolü, Yüksek lisans tezi,
- Sel, Ö. F., 2013. Atık Biyodizel Kullanılan Bir Motorda Yakıt Katkısının Performans Ve Emisyonlara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sharma, R. K. and Bakhshi, N. N., 1993. Catalytic upgrading of pyrolysis oil. *Energy & fuels*, 7 (2), 306-314.

- Simsek, S., Uslu, S. and Coştu, R., 2021. A novel approach to study the effect of motor silk-added pyrolysis tire oil on performance and emission characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 288 119668.
- Singh, R., Ruj, B., Sadhukhan, A., Gupta, P. and Tigga, V., 2020. Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics. *Fuel*, 262 116539.
- Svensson, K. I. (2005). *Effects of fuel molecular structure and composition on soot formation in direct-injection spray flames*: Brigham Young University.
- Taşçı, A., 2010. Piroliz edilmiş atık araç lastiklerinden elde edilen atık yağ ve karbon siyahı ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının reolojik özellikleri. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125s, Konya.
- Thiyagarajan, S., Geo, V. E., Martin, L. J. and Nagalingam, B., 2019. Comparative analysis of various methods to reduce CO₂ emission in a biodiesel fueled CI engine. *Fuel*, 253 146-158.
- Umeki, E. R., de Oliveira, C. F., Torres, R. B. and dos Santos, R. G., 2016. Physico-chemistry properties of fuel blends composed of diesel and tire pyrolysis oil. *Fuel*, 185 236-242.
- Uyar, M. and Aydın, H., 2022. Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine. *Energy*, 244 122683.
- Uzun, S., 2020. Dizel bir motorda atık lastikten elde edilen pirolitik yakıtın motor performans ve emisyonlarına etkisi, Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi.
- Wang, W.-C., Bai, C.-J., Lin, C.-T. and Prakash, S., 2016. Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 93 330-338.
- Wiriyaumpaiwong, S. and Jamradloedluk, J., 2017. Distillation of pyrolytic oil obtained from fast pyrolysis of plastic wastes. *Energy Procedia*, 138 111-115.
- Yakaboğlu, O., 2010. Atık lastik yönetimi ve atık lastik pirolizi model tesisi için yapılabilirlik çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yanowitz, J., Ratcliff, M. A., McCormick, R. L., Taylor, J. D. and Murphy, M. J. (2017). *Compendium of experimental cetane numbers*. Retrieved from
- Yılgin, M., Duranay, N. D. and Pehlivan, D., 2005. Odunun Flash Pirolizi, Paper presented at the III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin.
- Zabaniotou, A., Kalogiannis, G., Kappas, E. and Karabelas, A., 2000. Olive residues (cuttings and kernels) rapid pyrolysis product yields and kinetics. *Biomass and bioenergy*, 18 (5), 411-420.
- Zhang, G., Chen, F., Zhang, Y., Zhao, L., Chen, J., Cao, L., Gao, J. and Xu, C., 2021. Properties and utilization of waste tire pyrolysis oil: A mini review. *Fuel Processing Technology*, 211 106582.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Turan DURNAGÖL
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Eğitim	
Lise:	Çok programlı lise
Lisans:	Kafkas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2018)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi