



**ATIK TRAFO YAĞI, ATIK BİTKİSEL YAĞLARDAN
ÜRETİLEN BİYODİZEL İLE DİZEL KARIŞIMLARININ
KARAKTERİZASYONU, MOTOR PERFORMANS VE
EMİSYONLARININ SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ BİR
MOTORDA DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Muhammet BÜYÜKOĞLU

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER
2023**

(Her hakkı saklıdır.)

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

**ATIK TRAFO YAĞI, ATIK BİTKİSEL YAĞLARDAN ÜRETİLEN BİYODİZEL İLE
DİZEL KARIŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU, MOTOR PERFORMANS VE
EMİSYONLARININ SIKIŞTIRMA İLE ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

(Waste Transformer Oil, Characterization of Biodiesel Produced from Waste Vegetable Oils
and Diesel Blends, Experimental Investigation of Engine Performance and Emissions in a
Compression Ignition Engine)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet BÜYÜKOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Erzurum
Haziran, 2023

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Muhammet BÜYÜKOĞLU tarafından hazırlanan “Atık Trafo Yağı, Atık Bitkisel Yağlardan Üretilen Biyodizel ile Dizel Karışımlarının Karakterizasyonu, Motor Performans ve Emisyonlarının Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorda Deneysel Olarak incelenmesi” başlıklı çalışması 14/06/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç.Dr. Faruk YEŞİLDAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi (Danışman):	Dr.Öğr.Üyesi İlhan Volkan ÖNER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır.
Jüri Üyesi:	Dr.Öğr.Üyesi Orhan ARPA <i>Dicle 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.

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.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER* danışmanlığında sunulan “Atık Trafo Yağı, Atık Bitkisel Yağlardan Üretilen Biyodizel ile Dizel Karışımlarının Karakterizasyonu, Motor Performans ve Emisyonlarının Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motorda Deneysel Olarak incelenmesi” 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	15	30
Kuramsal Temeller	5	30
Materyal ve Yöntem	13	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	5	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	8	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
Muhammet BÜYÜKOĞLU	Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER
14.6.2023	14.6.2023
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

Tez çalışmam boyunca elinden gelen bütün katkıları sağlayan değerli danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER'e teşekkürlerimi sunar ve bana verdiği tüm emekler için kendisine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında motor deneylerini yapmama yardımcı olan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Orhan ARPA' ya verdiği emekler için kendisine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında yakıtların kimyasal analizlerini yapmama yardımcı olan değerli hocam Doç.Dr. Tuba Hatice DOĞAN' a verdiği emekler için kendisine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam kapsamında biyodizel üretimine yardımcı olan değerli hocam Prof.Dr. Hayrunnisa NADAROĞLU' a verdiği emekler için kendisine çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar aldığım kararlarda beni destekleyen ve her daim yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Muhammet BÜYÜKOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK BİTKİSEL YAĞLARDAN ÜRETİLEN BİYODİZEL VE ATIK TRAFO YAĞININ FARKLI ORANLARDA DİZEL KARIŞIMLARININ MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA OLAN ETKİLERİ

Muhammet BÜYÜKOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Amaç: Dünya nüfusu her geçen yıllarda sürekli olarak artış sağlaması sonucunda enerjiye olan talepte o sıklıkta artış göstermektedir. Kullandığımız enerji kaynaklarının büyük bir çoğunluğunun fosil kaynaklı yakıt türlerinden karşılanmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların her geçen yılda kullanımının artması sonucunda rezervlerin azalması ve sınırlı bir sayıda oluşundan dolayı artan enerji talebinin karşılanabilmesi için ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Dünya genelinde bitkisel atık yağların ve elektrik endüstrisi atığı olan atık trafo yağının alternatif yakıt hammaddeleri olarak değerlendirilmesi önemlidir. Bu çalışmada, üretilen biyodizel, Euro dizel ve atık trafo yağı karışımlarının sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda alternatif bir yakıt türü olarak faydalanıla birliği deneysel olarak ele alınmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, bitkisel atık yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen biyodizelin ve atık trafo yağının farklı oranlarda Euro dizel yakıt ile yakıt karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan yakıt karışımlarının ve üretilen biyodizelin FT-IR ve TG/DSC ürün özellikleri ve bunun yanında birçok termofiziksel özelliklerinin belirlenerek karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında hazırlanan yakıt karışımlarının sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda motor performansı ve emisyon özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Deneyler 2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak devir sayılarında 5 farklı yakıt karışımı ile gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Tüm devir sayılarında ortalama tork değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD30 yakıtında görülmüştür. Yakıt karışımları içerisinde en iyi ortalama tork değerine D100'e göre %6,48 düşüşle TD30B10 sahiptir. Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama BP değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD30 yakıtında görülmüştür. Yakıt karışımları içerisinde en iyi ortalama BP değerine TD30B10 sahiptir. Tüm motor devirlerinde yapılan deneylerde Euro dizel (D100) yakıtının özgül yakıt tüketimi değeri diğer yakıt karışımlarına göre en düşük değerleri almıştır. NO_x emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devirlerinde ölçülen NO_x emisyonlarının ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %23,98 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %14,92 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %18,78 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %14,03'lük bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Sonuç: TG-DSC analizi sonucunda en iyi yanma performansını sergileyen yakıt karışımının TD30B10 yakıt karışımı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda dizel yakıt yerine bitkisel atık yağlardan elde edilen biyodizel, atık trafo yağı ve Euro dizelden oluşan üçlü yakıt karışımları bir alternatif yakıt türü olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Dizel yakt, Atık trafo yağı, Biyodizel, Alternatif yakıt, Emisyon, TG, DSC, FT-IR.

Haziran 2023, 80 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

THE EFFECTS OF BIODIESEL AND WASTE TRANSFORMER OIL PRODUCED FROM WASTE VEGETABLE OILS IN DIFFERENT PROPORTIONS OF DIESEL MIXTURE ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS

Muhammet BÜYÜKOĞLU

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi İlhan Volkan ÖNER

Purpose: As the world's population increases continuously with each passing year, the demand for energy increases at that frequency. The majority of the energy resources we use are met from fossil fuel types. As a result of the increase in the use of fossil fuels every year, the decrease in the reserves and the limited number of them have led countries to alternative energy sources in order to meet the increasing energy demand. It is important to evaluate waste vegetable oils and waste transformer oil, which is the waste of the electricity industry, as alternative fuel raw materials around the world. In this study, the use of produced biodiesel, Euro diesel and waste transformer oil mixtures as an alternative fuel type in compression ignition engines has been experimentally discussed.

Method: In this study, fuel mixtures of biodiesel obtained from vegetable waste oils by transesterification method and waste transformer oil with different ratios of Euro diesel fuel were prepared. FT-IR and TG/DSC product properties of the prepared fuel mixtures and produced biodiesel, as well as many thermophysical properties were determined and their characterization was carried out. Afterwards, the effects of the prepared fuel mixtures on engine performance and emission characteristics in a compression ignition engine were investigated. The experiments were carried out with 5 different fuel mixtures at 2500, 2000, 1500 and 1000 rpm.

Findings: The highest average torque value was seen in D100 fuel and the lowest in TD30 fuel at all revs. The TD30B10 has the best average torque value among the fuel mixtures, with a decrease of 6.48% compared to the D100. The average BP value produced by each fuel at all revolutions was highest in D100 fuel and lowest in TD30 fuel. TD30B10 has the best average BP value among fuel mixtures. In the tests performed at all engine speeds, the specific fuel consumption value of Euro diesel (D100) fuel was the lowest compared to other fuel mixtures. When the average values of NO_x emissions are compared with the average values of NO_x emissions measured at all engine speeds of Euro diesel (D100) fuel, 23.98% decrease in TD30 fuel mixture, 14.92% decrease in TD30B10 fuel mixture, 18.78% decrease in TD30B20 fuel mixture and TD30B30 fuel mixture. On the other hand, it was determined that there was a decrease of 14.03%.

Results: As a result of the TG-DSC analysis, it was determined that the fuel mixture exhibiting the best combustion performance was the TD30B10 fuel mixture. In this study, ternary fuel mixtures consisting of biodiesel obtained from vegetable waste oils, waste transformer oil and Euro diesel can be used as an alternative fuel type instead of diesel fuel in compression ignition engines.

Keywords: Diesel fuel, Waste transformer oil, Biodiesel, Alternative fuel, Emissions, TG, DSC, FT-IR

June 2023, 80 pages

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	10
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlar Hakkında Genel Bilgiler	10
Dizel Yakıt Özellikleri	11
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Yanma Olayının Aşamaları	12
Tutuşma gecikmesi (TG).....	13
KontROLSÜZ yanma	14
Kontrollü yanma.....	14
Art yanma.....	14
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Zararlı Emisyonlar.....	15
Partikül maddeler (PM)	15
Azot Oksit (NO _x).....	15
Karbonmonoksit (CO).....	15
Kükürtdioksit (SO ₂)	15
Hidrokarbonlar (HC)	16
Biyodizel	16
Biyodizelin Üretiminde Kullanılan Hammadde Kaynakları.....	17
Türkiye’de Biyodizel Üretim Potansiyeli	18
Biyodizelin Teknik Özellikleri.....	19
Toksik etki.....	19
Biobozunabilirlik	20
Soğukta akış özellikleri	20
Depolama	20

Biyodizel Yakıt Özellikleri	20
Biyodizel Üretim Yöntemleri.....	21
Piroliz yöntemi	21
Mikroemülsiyon oluşturma yöntemi	21
Seyreltme yöntemi	21
Transesterifikasyon yöntemi	22
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Biyodizel Yakıtı Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları	24
Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda biyodizel yakıtı kullanımının avantajları	24
Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda biyodizel yakıtı kullanımının dezavantajları.....	24
Biyodizelin Alternatif Yakıt Olarak Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Kullanımı...	24
Trafo Yağları	25
Trafo Yağı Çeşitleri.....	26
Naftenik trafo yağları	26
Parafinik trafo yağları	26
Atık Trafo Yağları.....	27
Atık Trafo Yağlarının Özellikleri.....	28
Atık Trafo Yağlarının Tekrardan Kullanılabilmesi İçin Yapılan İyileştirmeler	28
MATERYAL VE METOT	30
Bitkisel Atık Yağlardan Transesterifikasyon Yöntemiyle Biyodizel Üretimi	30
Alkol ve Katalizörün Karıştırılması İşlemi	31
Reaksiyon aşaması	31
Reaksiyon sonucunda açığa çıkan fazların ayrılması işlemi.....	32
Ayrışan gliserin ve biyodizelden alkolün uzaklaştırılması	33
Atık Trafo Yağının Temin Edilmesi	33
Biyodizel, Euro Dizel, Atık Trafo Yağı ve Yakıt Karışımlarının Hazırlanması.....	33
Biyodizel, Euro Dizel, Atık Trafo Yağı ve Yakıt Karışımlarının Karakterizasyonu.....	34
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Test Motorun Özellikleri, Performansı ve Emisyonları	35
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Özellikleri ve Kontrol Ünitesi	36
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Emisyonları ve Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı	39
Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Performansı ve Hesaplamaları.....	40
Tork.....	40
Fren gücü.....	40
Fren özgül yakıt tüketimi	41
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	42

Hazırlanan Yakıt Karışımlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellik Analizleri	42
Gaz kromatografi analizi.....	42
Numunelerin yakıt özelliklerinin analizi.....	43
FT-IR analizi	44
TG/DSC analizi.....	46
Yakıt Karışımların Motor Performans Testleri	47
Tork (T).....	48
Fren gücü (BP).....	49
Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC).....	50
Yakıt Karışımların Emisyon Testleri	51
CO emisyonu.....	51
NO emisyonu	53
NO _x emisyonu	54
Egzoz gaz sıcaklığı (EGT)	55
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	57
Sonuçlar.....	57
Öneriler	59
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Dizel Yakıt Özellikleri.....	11
Tablo 2. Biyodizel-Dizel Yakıt Karışım Oranları	17
Tablo 3. Biyodizel Üretiminde Kullanılan Hammadde Kaynakları	17
Tablo 4. Türkiye’deki Biyodizel Üretimin Sayısı ve Kapasiteleri	19
Tablo 5. Biyodizel ve Dizel Yakıt Özelliklerinin Karşılaştırılması.....	19
Tablo 6. Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Metanolün (CH ₃ OH) Bazı Özellikleri.....	31
Tablo 7. Biyodizel, Atık Trafo Yağı ve Euro Dizel Yakıt Karışım Miktarları ve Oranı.....	34
Tablo 8. Örneklerin Karakterizasyonunda Kullanılan Ekipmanlar ve Yöntemler	35
Tablo 9. Sıkıştırma ile Ateşlemeli Test Motorunun Özellikleri	39
Tablo 10. Testo 350 Egzoz Gazı Emisyon Ölçüm Cihazı Özellikleri	40
Tablo 11. Atık Zeytin Çekirdeği Yağından Üretilen Biyodizelin Yağ Asidi Metil Ester Kompozisyonu	43
Tablo 12. Yakıt Numunelerinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri	43
Tablo 13. Biyodizel (B100), Euro Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve Karışımlarının Absorbans Bant Aralığı.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların çalışma prensibi	10
Şekil 2. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma diyagramı.....	13
Şekil 3. Türkiye’de biyodizel üretiminin yapıldığı iller.....	18
Şekil 4. Transesterifikasyon İşlem Şeması.....	22
Şekil 5. Trigliseritlerin Alkol ile Transesterifikasyonu (a) Genel Denklem, (b) Tersinir Basamak Reaksiyonları	23
Şekil 6. Trafo yağı	26
Şekil 7. Transesterifikasyon yönteminin aşamaları.....	30
Şekil 8. Atık zeytin ve çekirdeği yağı	31
Şekil 9. Transesterifikasyon yöntemi deney düzeneği	32
Şekil 10. Transesterifikasyon yönteminin reaksiyon denklemi.....	32
Şekil 11. Transesterifikasyon sonucu üretilen biyodizel.....	33
Şekil 12. Deneyde kullanılan atık trafo yağı	33
Şekil 13. Atık trafo yağı, biyodizel ve euro dizel yakıtları ve karışımları	34
Şekil 14. Elektronik kontrol paneli.....	36
Şekil 15. Yakıt büreti ve deposu	37
Şekil 16. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motoru ve dinamometresi	37
Şekil 17. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunun deney düzeneği	38
Şekil 18. Testo 350 egzoz emisyon ölçüm cihazı	39
Şekil 19. Biyodizel numunesinin GC spektrumu	42
Şekil 20. Biyodizel (B100), euro dizel (D100), atık trafo yağı (T100) ve karışımlarının kızılötesi spektrumları	45
Şekil 21. TD30B10 Numunesinin TG (ağırlık kaybı %) ve DSC Eğrileri.....	47
Şekil 22. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak’ya göre tork (T) değişimleri.....	48
Şekil 23. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak’ya göre fren gücü (BP) değişimleri	49
Şekil 24. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak’ya göre fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)	50
Şekil 25. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak’ya göre CO emisyonlarının değişimleri.....	52

Şekil 26. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre NO emisyonlarının değişimleri	53
Şekil 27. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre NO _x emisyonlarının değişimleri	54
Şekil 28. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre egzoz gaz sıcaklığı (EGT) değişimleri	56



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
B100	: %100 Biyodizel
BBDM	: Biyodizel Bazlı Sondaj Çamuru
BD	: Rafine Edilmiş Atık Trafo Yağı
BP	: Fren Gücü
BSFC	: Fren Özgöl Yakıt Tüketimi
CCWTO	: Katalitik Parçalanmış Atık Trafo Yağı
CI	: Sıkıştırma İle Ateşlemeli
D100	: %100 Euro Dizel
DI	: Direkt Enjeksiyonlu
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi
EGT	: Egzoz Gazı Sıcaklığı
EN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi Analizi
GC	: Gaz Kromatografisi
IDI	: Endirekt Enjeksiyonlu
OBM	: Yağ Bazlı Çamur
PM	: Partikül Madde
RWTO	: Rafine Atık Trafo Yağı
SASO	: Tatlı Badem Tohumu
T	: Tork
T100	: %100 Atık Trafo Yağı
TD30	: %30 atık trafo yağı, %70 euro dizel yakıt
TD30B10	: %27 atık trafo yağı, %63 euro dizel yakıt, %10 biyodizel
TD30B20	: %24 atık trafo yağı, %56 euro dizel yakıt, %20 biyodizel
TD30B30	: %21 atık trafo yağı, %49 euro dizel yakıt, %30 biyodizel
TG	: Tutuşma Gecikmesi
TGA	: Termogravimetrik Analiz

Simgeler

°C	: Sıcaklık
CH₃OH	: Metanol
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
dev/dak	: devir/dakika
g/kWh	: gram/ kilowattsaat
H₂SO₄	: Sülfirik Asit
HC	: Hidrokarbonlar
mL	: mililitre
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Nm	: Newtonmetre
NO	: Azot monoksit
NO_x	: Azotoksit
SO₂	: Kükürtdioksit

GİRİŞ

Dünya enerji gereksiniminin çoğunluğunu fosil kaynaklı yakıtlardan sağlamaktadır. Dünya nüfusunun her geçen yıllarda giderek artmasının sonucunda fosil kökenli yakıtların kullanımı da artmaktadır. Fosil kökenli kaynakların kullanımının giderek artması sonucunda bulunan rezervlerin yüzyıl içinde depo miktarlarının azalacağı öngörülmektedir. Bu nedenden dolayı fosil yakıt rezervlerinin sınırlı sayıda oluşu ve tükenme olasılığının oluşu ülkelerin ekonomik ve siyasi meselelere yol açmasına sebep olabilmektedir. Fosil kökenli yakıt rezervlerinin azalması, doğaya ve çevreye verilen zararların artması, petrol fiyatının sürekli olarak artışı ve petrol kökenli yakıtların yanması sonucunda açığa çıkan zararlı emisyonların hava kirliliğine sebep oluşu vb. sebeplerin sonucunda ülkeleri alternatif enerji kaynaklarına yöneltmiştir.

Gelişmiş ülkelerde biyolojik kökenli yakıtlar olan biyogaz, sentetik yakıtlar ve bitkisel yağların kullanımı önem kazanmaktadır. Biyolojik kökenli yakıt türlerinin petrol kaynaklı olan dizel yakıtla benzer özellikler gösterdiği ve dizel yakıt yerine direkt olarak kullanılabilir veya bazı iyileştirmeler yapılarak kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır (Horuz *et al.*, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynakları olan biyoyakıtlar, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi fosil kökenli yakıtların kullanımlarını azaltmak için alternatif yakıt türü olarak kullanılabilirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biyoyakıtın türevi olan biyodizelin diğer enerji kaynaklarına göre çevreci oluşu, oksijen içermesi, partikül ve karbon monoksit emisyonlarını azaltması, bitkisel atık yağların yakıt olarak değerlendirilebilmesi ve dizel yakıtla benzer özellik göstermesinden dolayı dizel yakıt ile belirli oranlarda karıştırılarak kullanımının sağlanması gibi özellikleri biyodizelin kullanımını arttırmaktadır (Zlenc *et al.*, 2012).

Biyodizel üretiminde kullanılan en önemli hammaddeler hayvansal ve bitkisel yağlardır. Bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabilirliğini Rudolph DIESEL tarafından ilk olarak 1900'lü yıllarda yer fıstığı yağıyla bir dizel motorunu çalıştırarak göstermiştir. Atık bitkisel yağlar, atık plastikler, atık lastikler, kullanılmış motor yağları ve atık trafo yağları gibi birçok atıklar yakıt olarak değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Atık bitkisel kökenli yağlardan biyodizel üretimi transesterifikasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Üretilen biyodizel sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda herhangi bir modifikasyona gidilmeden yakıt olarak kullanılabilirler. Bitkisel atık yağlardan farklı olarak atık motor yağları ve kullanılmış lastiklerden piroliz yöntemi kullanılarak yakıt elde edilmektedir (Öner *et al.*, 2023).

Basha *et al.* , (2009), çalışmalarında 1980-2008 yılları arasında yapılan alternatif yakıt olarak biyodizel üretiminin ve motor performansına olan etkilerini incelemek için 130 bilim insanının araştırmalarını incelemiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda yakıt olarak bitkisel yağların kullanılmasının sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda motor testlerinin iyi sonuçlar verdiği, fakat motorun çok uzun süreli olarak çalışması durumunda motor arızalarına neden olan yağlama yağı kirliliğinin ve aşırı karbon birikiminin olduğunun sonucuna varmışlardır. Bu sorunun giderilmesi için dizel yakıt ile belirli oranlarda karıştırılıp kullanılması gerektiğinin sonucuna varmışlardır. Bitkisel yağlardan üretilen biyodizelin dizel yakıtı benzer özellikler gösterdiği ve dizel yakıt ile karışımlarının daha yüksek ateşleme basıncı, daha yüksek tutuşma sıcaklığı ve daha kısa tutuşma gecikmesi gerçekleştiğinin sonucuna varmışlar. Ayrıca motor gücünün dizel yakıtı eşdeğer bir değerde olduğunu ve biyodizel üretiminde bazı katalizörler ve enzimlerle daha etkili bir alternatif yakıt elde edildiğini gözlemlemişler (Basha *et al.*, 2009).

Simsek ve Uslu ,(2020), çalışmalarında kanola ve aspir bitkilerinden ve atık bitkisel yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel (AFDB) ile hayvansal yağlardan elde edilen biyodizelin dört zamanlı tek silindirli bir dizel motorun performans ve emisyonlarına olan etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde D100 (%0 Biyodizel + %100 Dizel), AFBD100 (%0 Dizel + %100 Hayvansal Biyodizel), VEBD100 (%0 Dizel + %100 Bitkisel Biyodizel), VEBD50 (%50 Dizel) olmak üzere beş farklı yakıt ve yakıt karışımları kullanılmıştır. Yapılan deney sonucunda AFBD100 ve VEBD100 yakıtlarının kullanılmasıyla D100 yakıtına göre fren termik verimlerinin düştüğü ve fren özgül yakıt tüketimlerinin (BSFC) ise arttığını görülmüştür. Motor emisyonları açısından ise AFBD100 ve VEBD100 yakıtlarının kullanılmasıyla duman, hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonlarında azalma olduğunu gözlemlemişler. Ayrıca, VEBD içeren yakıt ve karışımlarının kendi aralarında karşılaştırıldığında motor performansı en iyi olanın VEBD50 olmasına rağmen emisyon açısından ise VEBD100 diğerlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Simsek & Uslu, 2020).

Balat and Balat, (2010), biyodizel, kolza tohumu, soya fasulyesi ve atık yemeklik yağlardan petrol türevi dizel yakıtı benzer özelliklerde üretilmektedir. Fakat üretilen bu yağların viskoziteleri çok yüksektir. Yüksek viskozite motor enjeksiyon sistemlerine zarar vermektedir. Bu sorunun giderilmesi için biyodizele dönüştürme işlemi yani transesterifikasyon işlemi uygulanmaktadır. Bu yöntem dışında piroliz, seyreltme ve mikro emülsiyon yöntemleride uygulanabilmektedir. Transesterifikasyon yöntemi en çok kullanılan yöntemdir. Bitkisel yağların transesterifikasyonu ile üretilen metil esterler, saf bitkisel yağlarla karşılaştırıldığında düşük viskoziteye, yüksek setan sayısına ve iyileştirilmiş ısıtma değerine

sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı daha kısa zamanlı bir tutuşma gecikmesi ve daha uzun süreli yanma süresi ve daha düşük partikül emisyonları ile motor deneyleri sonuçlanmıştır (Balat & Balat, 2010).

Simsek,(2020), çalışmasında transesterifikasyon yöntemi ile aspir, kanola ve atık yağlardan biyodizel üretimini ve üretilen biyodizelin dizel yakıt ile karışımlarının dört zamanlı tek tek silindirli bir sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda alternatif bir yakıt türü olarak kullanılmasını araştırmıştır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda motor performansı, yanma özellikleri ve emisyonları incelenmiştir. Yapılan deney sonucuna göre karışımlardaki biyodizelin oranı arttıkça dizel yakıtı göre özgül yakıt tüketimi ve fren ısı veriminin arttığı, fakat BD100 kullanılması durumunda ise bu değerler %1,95 azaldığı tespit edilmiştir. Emisyonlar açısından ise karbon monoksit (CO) miktarı %34,28, hidrokarbon (HC) miktarı %17,49, duman emisyonu %50,95 oranında azaldığı görülmüştür. Ancak nitrik oksit (NO_x) %80,50 ve karbondioksit (CO₂) %42,62 artış göstermiştir (Simsek, 2020).

Utlu ve Koçak (2008) ,çalışmalarında atık kızarma yağlarında (WFO) biyodizel üretimini incelemiştir. Atık yağlardan metil ester üretimi için bir reaktör tasarlamışlardır. Bu reaktörden elde edilen metil esterlerin özellikleri incelenmiş ve dizel yakıt ile kıyaslanmıştır. Deneyler direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda yapılmıştır. Deney sonuçları, dizel yakıt ile karşılaştırıldığında özgül yakıt tüketiminin yaklaşık olarak aynı değerde olduğunu ve emisyonlar açısından ise dizel yakıtı göre CO, CO₂ ve NO_x emisyonları azaldığının sonucuna varmışlardır (Utlu & Koçak, 2008).

M. E. Kassaby and M. A. Nemit-Allah ,(2013), çalışmalarında restoranlarda açığa çıkan atık yemeklik yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimini ve sıkıştırma oranının motor performansını üzerine etkilerini incelemiştir. Karışımlar B0, B10, B20, B30 ve B50 şeklinde hazırlanmıştır ve 14/1, 16/1 ve 18/1 sıkıştırma oranlarının hazırlanan her bir yakıt karışımı için sıkıştırma oranları arttıkça motor torklarının arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, sıkıştırma oranı arttıkça tüm karışımların fren özgül yakıt tüketimlerinin (BSFC) azaldığı sonucuna varmışlardır. Sıkıştırma oranının 14'ten 18'e yükseltilmesiyle hazırlanan B10, B20, B30 ve B50 yakıt karışımlarının fren termal verimlerindeki artış oranları sırasıyla %18.39, %27.48, %18.5 ve %19.82'dir. Emisyonlar açısından ise ortalama olarak CO ve HC emisyonları sırasıyla %37,5 ve %52 oranlarında azalmıştır. Fakat ortalama CO₂ emisyonu %14,2 ve NO_x emisyonu %36,84 oranlarında bir artış olduğunu gözlemlemiştir. Sıkıştırma oranının 14'ten 18'e arttırılması sonucunda tutuşma gecikme süresinin %13,95 oranında azaldığını ve sıkıştırma oranının arttırılmasının dizel yakıtı göre biyodizelin daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir (El-Kassaby & Nemit-Allah, 2013).

Sanli *et al.* ,(2015), çalışmalarında etanol ve metanol kullanılarak atık kızartma yağlarından biyodizel üretimini ve motor performansı özelliklerini incelemiştir. Testler direkt enjeksiyonlu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda 600 Nm torkunda ve üç farklı motor devrinde (1100, 1400 ve 1700 dev/dak) gerçekleştirilmiştir. Yakıt karışımı ise üretilen biyodizelin %20 oranında olacağı şekilde dizel yakıt ile karıştırılmıştır ve motor testleri gerçekleştirilmiştir. Motor testi sonuçlarına göre dizel yakıt ile karşılaştırıldığında ester yakıtların fren özgül yakıt tüketimlerinin (BSFC) daha yüksek olduğu görülmüştür. Metil ester biyodizeli ile etil ester biyodizeli karşılaştırıldığında ise etil ester biyodizelinin BSFC'sinin daha düşük olduğunu ve daha iyi bir termal verime sahip olduğunu görmüşlerdir. Emisyonlar açısından karşılaştırıldığında bu esterler dizel yakıtı göre daha az CO ve HC emisyonu açığa çıkarmalarına karşın daha fazla NO_x emisyonu üretmektedirler. CO₂ emisyon üretim oranlarının ise değişmediğini görmüşlerdir (Sanli *et al.*, 2015) .

Prasanna *et al.* , (2015), çalışmalarında atık trafo yağının sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda bir yakıt türü olarak kullanılmasını ve atık trafo yağının çevreye atılmasını engelleyerek çevre sorunlarının azaltılmasını yönelik çalışmalar yapmışlardır. Atık trafo yağını katalitik bir kırma işlemine tabi tutmuşlardır ve sonucunda yağ ve katalizör atık ürünleri meydana gelmiştir. Katalizör olarak aktifleştirilmiş uçucu kül kullanımıyla katalitik kırma işlemi daha düşük reaksiyon sıcaklıklarında gerçekleştiğini ispatlamışlardır. Katalitik kırma reaksiyonu 350-400 °C aralığında gerçekleşmiştir. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan katalitik olarak parçalanmış atık trafo yağının ASTM standartlarına uygun olduğu görülmüştür. CCWTO 50'nin (%50 dizel ,%50 katalitik parçalanmış atık trafo yağı) motor deney sonuçlarına göre BTE (fren termal verimliliği) dizel yakıtı göre %7.4 oranında arttırdığı ve yanma özelliklerini iyileştirdiklerini ispatlamışlardır. Emisyonlar açısından ise HC (hidrokarbon), CO(karbon monoksit) ve duman azalırken NO_x emisyonunda bir artış yaşanmıştır (Prasanna Raj Yadav *et al.*, 2015).

Nabi *et al.* (2013) ,çalışmalarında atık trafo yağının sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda yakıt olarak kullanılmasının araştırmasını yapmışlardır. İlk olarak atık trafo yağının yoğunluk, kinematik viskozite, setan sayısı, kalorifik değer, parlama ve yanma noktaları gibi özellikleri belirlenmiştir. Daha sonrasında atık trafo yağı transesterifikasyon yöntemi ile rafine edilmiştir. WTO (atık trafo yağı), RWTO (rafine atık trafo yağı) ve dizel yakıt özellikleri karşılaştırılmıştır ve dizel yakıt özelliklerine yakın olduğu görülmüştür. Motor deneyi sonucunda ise WTO ve RWTO'nun motor performansının ve yanma özelliklerinin dizel yakıtı göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Bunun sonucunda WTO ve RWTO'nun sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar için alternatif bir yakıt olarak kullanılabileceğinin sonucuna varmışlardır (Nabi *et al.*, 2013).

Yadav *et al.* (2015) , çalışmalarında atık trafo yağının direkt enjeksiyonlu sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda dizel yakıt ile karışımlarının kullanılabileceğine yönelik bir deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, atık trafo yağının yüksek viskozitesinin düşürülmesi için baz katalizörlü transesterifikasyon işlemiyle üretimi yapılan atık trafo yağı ve dizel yakıt ile karışımlarının direkt enjeksiyonlu, dört zamanlı bir sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda performans ve emisyon özelliklerinin incelemiştir. Motor deneyleri dört enjeksiyon zamanına (23°, 22°, 21° ve 20° bTDC) göre yapılmıştır. Sonuç olarak standart enjeksiyon zamanlamasına göre 20° bTDC'lik enjeksiyon zamanlamasının yanmamış hidrokarbon, karbon monoksit ve nitrojen emisyonlarında sırasıyla %10 , %17.24 ve %11.57 oranlarında azalma göstermiştir. Tam yük koşullarında ise BTE'nin (fren termal verimliliği) arttığı görülmüştür (Yadav *et al.*, 2015).

Ajay *et al.* (2020), çalışmalarında alternatif yakıt olarak atık trafo yağını incelemiştir. İlk olarak atık trafo yağına transesterifikasyon işlemi uygulamışlardır ve rafine etmişlerdir. BD (rafine edilmiş atık trafo yağı) belirli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak motor deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bu karışımlar BD100, B10, B20, B30, B40 ve D100'dür. Tek silindirli sıkıştırılmalı ateşlemeli motorda hazırlanan yakıt karışımı deneyleri arasında en iyi motor performans, emisyon ve yanma özelliği gösteren alternatif yakıt karışımının B30 olduğunun sonucuna varmışlardır (Ajay & Viswanath, 2020).

Belkhode *et al.* ,(2021), çalışmalarında transformatörlerde uzun süreli termal strese maruz kalmış atık trafo yağının atmosferik basınç altında damıtma işleminin yapılarak alternatif bir yakıt türü olarak kullanılmasını incelemiştir. Atık trafo yağı dizel yakıt ile %10, %20, %30 ve %40 oranlarında karıştırılarak sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar %10, %20, %30 ve %40 olarak hazırlana karışımların sırasıyla fren ısı verimleri %28,19, %27,52, %26,21 ve %25,98 olduğu görülmüştür. Özgül yakıt tüketimleri ise sırasıyla 0,29 KJ/Kwhr, 0,30 KJ/Kwhr 0,31 KJ/Kwhr ve 0,315 KJ/Kwhr'dir. Bu değerler sonucunda atık trafo yağının düşük karışım oranlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Belkhode *et al.*, 2021).

Sethuraman *et al.* ,(2022), çalışmalarında tek silindirli su soğutmalı direk enjeksiyonlu sıkıştırılmalı ateşlemeli bir motorda dizel ile karıştırılmış atık yemeklik yağ ve atık trafo yağı metil esterlerinin emisyon özelliklerini ve motor performansını incelemiştir. Yaptığı laşışmasında hindistan cevizi kabuğundan katalizör üretilmiştir. Üretilen katalizör, atık trafo yağı, atık yemeklik yağ ve metanolden transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel üretmek için gerekli olan katalizör olarak kullanılmıştır. Hem atık trafo yağı hem de atık yemeklik yağdan üretilen biyodizel karışımları (B20 + D80) ve (B40 + D60) şeklinde hazırlanmıştır. Deney

sonucuna göre B20 karışımının dizel yakıtı göre BTE (fren termal verimliliği) ve BSFC'yi (fren özgül yakıt tüketimi) arttırdığını ve CO (karbon monoksit) emisyonunun düştüğünü gözlemlemişlerdir. Fakat HC (hidrokarbon) ve NO_x emisyonlarında artışa neden olduğunu ortaya koymuşlardır (Sethuraman *et al.* 2022).

Cihan (2021), çalışmasında incir çekirdeği yağından üretilen biyodizel yakıtının yanma özelliklerini ve motor performans süreçlerini deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışmanın diğer çalışmalardan ayıran en önemli özelliği üretilen biyodizelin incir çekirdeği yağından üretilmiş olması ve ilk kez bu çalışmada bir dizel motorunda test edilmiş olmasıdır. Çalışmada dizel motor 1550, 1700, 1850, 2000 ve 2150 dev/dak motor devirlerinde ve tam yükte çalıştırılmış. Yapılan çalışmada dizel yakıtı hacimce %5, %10 ve %20 incir çekirdeği yağı metil esterini ilave edilmiştir. Daha sonrasında farklı oranlarda incir çekirdeği yağı metil esterinin silindir içi basınç, basınç artış hızı, net ısı salınımı üzerine etkileri, hız, fren özgül yakıt tüketimi, motor torku ve egzoz gazı sıcaklığı değerlendirilmiştir. Dizel ve biyodizel yakıtların silindir içi basıncı ve net ısı salım hızı sayısal ve deneysel olarak karşılaştırılmış ve birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda 2000 dev/dak 'da dizel, B5, B10 ve B20 yakıt ve karışımlarının sırasıyla silindir içi basınç değerleri 79,29, 81,21, 83,23 ve 82,25 bar ve fren özgül yakıt tüketimi değerleri ise sırasıyla 274, 279, 281 ve 285 g/kWh olarak sonuçlandığı görülmüştür. Yapılan çalışmanın sonucu olarak biyodizelin daha kısa bir tutuşma gecikmesi, yüksek oksijen içeriği ve dizele göre daha hızlı bir şekilde yanma gösterdiği sonucuna varılmıştır ve B10 yakıt karışımının daha iyi bir yanma sağladığını görmüştür (Cihan, 2021).

Singh ve Kumar (2022), çalışmalarında bütanol-biyodizel ve bütanol-biyodizel-dizel yakıt karışımlarının dizel motorlarda motor performans ve emisyon özelliklerini karşılaştırılmasını yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda bütanol-biyodizel-dizel yakıt karışımının motor performans özelliklerinin bütanol-biyodizel ve biyodizel-dizel yakıtı göre dikkate değer bir performans düşüşü olduğu görülmüştür ve dizel yakıtı göre ise az bir oranda düşüş gerçekleştiği sonucuna varmışlardır. bütanol-biyodizel-dizel yakıt karışımının yanma özellikleri biyodizel –dizel yakıtı göre benzer sonuçlar alınmıştır. Emisyon özellikleri bakımından en iyi büyük oranda düşüş sağlayan yakıt karışımının bütanol-biyodizel-dizel yakıt karışımı olduğunu ispatlamışlardır. Sonuç olarak bu çalışmada bütanolün motor performansını düşürmeye ve emisyonları azaltmaya yardımcı olabilecek bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varmışlardır. %20 oranında bütanol içeren bütanol- dizel yakıt karışımının dizel yakıttan sonra daha iyi motor performansı sonuçlar verdiğini görmüşlerdir (R. Singh & Kumar, 2022).

Atabani ve Al Kulthoom (2020), çalışmalarında biyodizel üretimi için hayvansal yağları ve yüksek sıcaklıklarda kullanılmış bitkisel yağları içeren atık yemeklik yağlardan biyodizel üretimini gerçekleştirmişlerdir. Biyodizel üretiminin yanı sıra ikili ve üçlü karışımların kalitesini Euro dizel ve daha yüksek pentanol ve oktanol alkollerini ile değerlendirilmesi incelenmiştir. Üretilen biyodizelin özelliklerinin hem EN 14214 hem de ASTM D6751 standartlarına uygun olduğunu ispatlamışlardır. Biyodizel- dizel yakıt karışımının içine pentanol veya oktanol alkollerinin eklenmesiyle yakıt karışımının soğuk akış özelliklerini ve yoğunluğunu iyileştirmiştir. Daha sonrasında yakıt karışımlarının fren ısı verimini, özgül yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarının (CO, NO_x) incelenmesi gerçekleştirilmiştir ve yakıt karışımlarına daha yüksek bir alkol ilave edilmesiyle olumlu etkilerin sağlandığını ispatlamışlardır. Çalışma sonucu olarak atık yemeklik yağların geri kazanılmasıyla yani atık yemeklik yağlardan biyodizel üretiminin gerçekleştirilmesi çalışmalarını desteklemektedirler (Atabani & AL Kulthoom, 2020).

Öztürk (2015) , çalışmasında 2 numaralı dizel yakıt ile kanola yağı ve fındık sabuntaşından üretilen biyodizelin karışımlarının bir dizel motorda motor performans, emisyon, enjeksiyon ve yanma özelliklerinin araştırılması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada biyodizel özelliklerinin iyileştirilmesi ve yakıt maliyetinin düşürülmesi için kanola yağından ve fındık sabuntaşında üretilen biyodizeller karıştırılmıştır. Deney numuneleri %5 ve %10 biyodizel içeren yakıt karışımı ve 2 numaralı dizel yakıt numunesi ile tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motor ile gerçekleştirilmiştir. Deneyin sonuçları olarak dizel yakıtı biyodizelin katılmasıyla enjeksiyon ve tutuşma gecikmelerinin ve maksimum ısı salım oranlarının azaldığını, enjeksiyon ve yanma sürelerinin ise arttığını görmüşlerdir. En iyi yanma özelliği gösteren yakıt karışımının %5 oranında biyodizel içeren karışım olduğunu ispatlamışlardır. %10 oranında biyodizel içeren yakıt karışımı yüksek yoğunluk ve viskozite nedeniyle yanmayı bozduğunu görmüşlerdir (Öztürk, 2015).

Oseh et al, (2019), çalışmalarında biyodizel bazlı sondaj çamurunu (BBDM) formüle etmek için sürekli faz olarak yenilemeyen tatlı badem tohumundan (SASO) elde edilen yağ kullanılmıştır. Bu özelliklerin sondaj sıvıları için uygulanabilirliğini ve çevreye toksisite seviyelerini belirlemek için BBDM'nin ekonomik uygulanabilirliği de dâhil olmak üzere farklı özellikleri değerlendirilmiştir ve dizel OBM (yağ bazlı çamur) 'ninkilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakılacak olursak BBDM'nin reolojisinin, filtrasyon özelliklerinin, elektriksel stabilitesinin, termal stabilitesinin ve şeyl şişmesi engelleme performansının dizel OBM'ninkilerle karşılaştırılabilir olduğunu ispatlamışlardır. Yapılan çalışmada dizel yakıtı göre biyodizelin 169°C' lik sıcaklıkla daha yüksek bir parlama noktasına sahip olduğunu

görmüşlerdir. Toksisite testinin verileri sonucunda SASO'nun kullanılan 2 numaralı dizele göre daha güvenli ve daha az zararlı olduğunu göstermişlerdir. 28 günlük biyolojik bozunma testleri sonucunda, BBDM ve dizel OBM, *Penicillium* sp ile % 83 ve % 25,2 aerobik biyolojik bozunma göstermişlerdir. Yapılan testlerin genel sonucu olarak SASO'nun, dizel OBM'nin çevresel ve teknik olarak uygulanabilir ve yerine kullanılabilme potansiyeline sahip olduğunu göstermişlerdir (Oseh *et al.*, 2019).

Dehghan *et al.* (2019), çalışmalarında biyodizel üretimi için zeytinyağının mikrodalga destekli transesterifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan transesterifikasyon reaksiyonunun değişkenleri metil esterlerin verimleri, fizikokimyasal özelliklerini ve saflığını etkilemiştir. Reaksiyonun değişkenleri ise reaksiyon süresi (3-15 dk), metanol-yağ molar oranı (3/15), mikrodalga güç seviyesi (100-900 W) ve katalizör konsantrasyonudur (%0,4-%2,0). Deney sonucunda biyodizeldeki metil ester verimi ve saflığı, katalizör miktarındaki artışa, reaksiyon süresine, metanolün yağ molar oranına ve güç seviyesine paralel olarak artış sağlamıştır. Mikro dalga destekli transesterifikasyon yöntemi geleneksel manyetik karıştırıcı transesterifikasyon yöntemine göre metil ester verimini daha çok arttırabilir ve reaksiyon süresini ve enerji tüketim miktarının azaltılabilir olduğunun sonucuna varmışlardır. Bunun sonucu olarak mikro dalga destekli transesterifikasyon yöntemi zeytinyağında biyodizel üretimi için oldukça hızlı bir yöntem olarak kullanılabilir olduğunun sonucuna varmışlardır (Dehghan *et al.*, 2019).

Karimi *et al.* (2020), çalışmalarında İran acı bademini kullanarak ve alkol olarak etanolü kullanarak transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonrasında üretilen biyodizel ile dizel yakıt karıştırılarak %5 ve %20 oranında biyodizel içeren B5 ve B20 yakıt karışımı hazırlanmıştır. ECE R-85 standardına göre motor testleri 1400 dev/dak ve 2000 dev/dak motor hızlarında ve dört farklı yükte (%25, %50, %75, %100) gerçekleştirilmiştir. Yapılan yakıt numunelerinin motor performans ve emisyon değerleri dizel yakıt ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre B20'de maksimum fren gücü (dizel yakıtla karşılaştırıldığında yaklaşık % 9,5 artış), % 20 yükte ve 2000 dev/dak'lık bir dönüş hızında artış sağlamıştır. Ayrıca BSFC'nin maksimum azalması (dizel yakıttan yaklaşık % 8,6 daha düşük) B20 için % 25'lik bir yükte ve 2000 dev/dak'lık bir dönme hızında gerçekleşmiştir. Yapılan emisyon karşılaştırılması sonucunda B5 ve B20 yakıt karışımlarının NO_x emisyonları dizel yakıtı göre yüksek çıkmıştır. CO₂ emisyonu ise B5 yakıt karışımı için 2000 dev/dak hızında dizel yakıtı göre tüm yüklerde daha düşük seviyelerde çıktığının sonucuna varmışlardır (Karimi *et al.*, 2020).

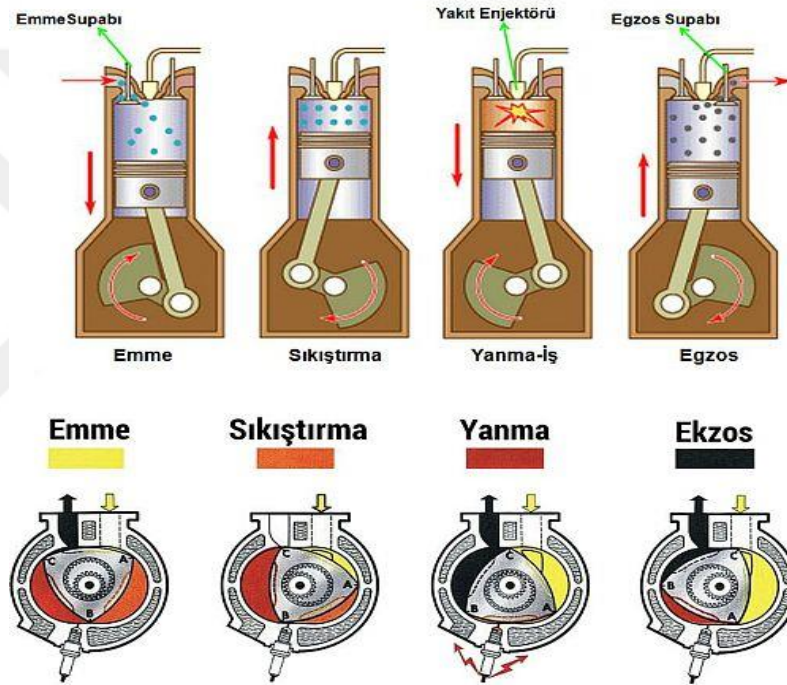
Öztürk et al, (2020) çalışmalarında kanola yağından üretilen biyodizel (%10) ile oluşturulan dizel yakıt (%90) karışımının doğrudan enjeksiyonlu dizel motorda yüksek NO_x emisyon seviyelerinin düşürülmesi için geciktirilmiş enjeksiyon zamanlamasının araştırmasını yapmışlardır. Deneyler dört farklı yük altında (3.75 Nm, 7.5 Nm, 11.25 Nm ve 15 Nm) ve üç farklı enjeksiyon zamanlaması (28 CA, 26 CA ve 24 CA BTDC) altında maksimum tork hızı 2000 dev/dak olan motor hızında gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında geciktirilmiş enjeksiyon zamanlamalarının, motor performansına, yanma ve emisyon üzerine etkilerinin incelenmesi yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre 2 CA'lık enjeksiyon geciktirmenin daha düşük NO_x'i karşılayabileceğini ve diğer motor parametreleri üzerinde önemli olumsuz etkiler yaratmadan spesifik yakıt tüketimini kırılabileceğini, enjeksiyon zamanlamasının daha da geciktirilmesinin parametreleri bozduğunu göstermişlerdir. 2 CA'nın geciktirilmiş enjeksiyon zamanlaması, NO_x emisyonunda % 11 ve BSFC'de % 2,7'lik bir düşüş sağladığını görmüşlerdir (Öztürk et al., 2020).

Bu tez çalışması ile transesterifikasyon yöntemiyle elde edilen biyodizel yakıt ve belirlenen oranlarda euro dizel ve atık trafo yağı karışımlarının kalorifik değeri, bulutlanma noktası, akma noktası, parlama noktası, yoğunluk, v.b. tüm termofiziksel özellikleri incelenecektir. FT-IR ve TG/DSC gibi ürün analizleri yapılacaktır. Son aşamada ise Sıkıştırılmalı Ateşlemeli motorda egzoz emisyon değerleri ve motor performansı incelenecektir. Bu çalışmanın sonucunda açığa çıkan atık bitkisel yağların ve atık trafo yağının çevre ve hava kirliliği sorununu ortadan kaldıracak ve elde edilen biyodizel ile belirlenen oranlarda euro dizel ve atık trafo yağı karışımının kullanılması ile birim yakıt tüketim seviyesinin düşürülmesi sağlanacaktır.

KURAMSAL TEMELLER

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlar Hakkında Genel Bilgiler

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar, motorun yakıt karışımını oluşturma şekline göre iki gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar Direkt Enjeksiyonlu (DI) ve Endirekt Enjeksiyonlu (IDI) Motorlar olarak ayrılmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma olayının gerçekleşmesi silindirde sıkıştırılmış durumda bulunan yüksek sıcaklık ve basınçtaki havaya yakıtın püskürtülmesi ile yanma olayı gerçekleşir.



Şekil 1. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların çalışma prensibi

Endirekt enjeksiyonlu motorlarda yanma olayının gerçekleşmesi ilk olarak ön yanma odasında başlamaktadır. Ön yanma odası dar geçit ile son yanma olayının gerçekleştiği ana yanma odasına bağlıdır. Sıkıştırma zamanında silindirden ilk yanmanın gerçekleştiği ön yanma odasına doğru hava geçişi olur ve buda ön yanma odasında bir hava hareketinin oluşmasına sebep olur. Oluşan bu hava hareketi yardımıyla ilk yanmanın gerçekleştiği ön yanma odasına püskürtülen yakıt ile havanın iyi karışımı sağlanır ve ön yanma odasında yanma işlemi başlar. İlk yanmanın gerçekleştiği ön yanma odasında yüksek sıcaklık ve basınç ile yanma olayı ana yanma odasında da devam eder ve bu şekilde yanma sağlanmış olur. Direkt enjeksiyonlu motorlarda ise endirekt enjeksiyonlu motorlarda olduğu gibi ön yanma odası yoktur ve yanma sadece ana yanma odasında gerçekleşmektedir. Bazı motorlarda yakıtın daha verimli bir şekilde

yanması sağlanması için piston içine alınan havanın geldiği giriş kanalları helisel bir şekilde yapılarak havanın türbülanslı bir şekilde gelmesi sağlanır. Bu sayede enjektörlerden püskürtülen yakıtın daha verimli bir şekilde yüksek basınç altında yanması sağlanır.

Yapılan deney sonuçlarına göre direkt ve indirekt enjeksiyonlu motorlar karşılaştırıldığında direkt enjeksiyonlu motorların az yakıt tüketimi ve daha yüksek verimli oluşundan dolayı direkt enjeksiyonlu motorlar daha çok kullanılmaktadır (Knothe *et al.*, 1997).

Dizel Yakıt Özellikleri

Dizel yakıt hakkında bazı önemli özellikler aşağıdaki Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Dizel Yakıt Özellikleri (Knothe *et al.* 1997)

Yakıt Özelliği	Değer
Setan Sayısı	40-55
Kül (% kütlece)	0,01
Yoğunluk (kg/m ³ , 15°C de)	0,85
Bulutlanma noktası (°C)	(-15) – 5
Alevlenme Noktası (°C, min.)	52
Kinematik viskozite (mm ² /s, 40 °C de)	1,9 – 4,1
Toplam kükürt (% kütlece, maks.)	0,05
Su ve tortu miktarı (% hacimce, maks.)	0,05

Viskozite, akışkanların akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların yakıt enjeksiyon sistemleri için çok önemli bir özelliktir. Yakıtların viskozitesi azaldıkça yakıt emme hattı borularında yakıtı uygulanan direnç azalmaktadır. Bu sayede yakıtın püskürtülmesi sırasında yakıt damlacıkları daha çok artmakta ve daha küçük çaplara bölünmektedir. Bu sayede sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma yüzey alanı daha çok artacağından bu tür motorlarda yanma daha verimli bir şekilde gerçekleşmekte ve yanma sonucunda daha az emisyonlar açığa çıkmaktadır (Safgönül, 1995).

Yakıtların birim hacmindeki kütle oranlarına yoğunluk denir. Yoğunluk özelliği yakıtların tutuşa bilirliliği, parçalanması ve içerisindeki karbon ve hidrojen oranları hakkında bilgi vermektedir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda motora alınan yakıtı enjeksiyon sistemleri hacimsel oranda gönderdiği için yakıtın özgül kütlesi motora aktarılan yakıtın kütle oranını etkilemektedir. Özgül kütle moleküllerdeki hidrojen sayısının artmasıyla azalmaktadır.

Dizel yakıtların içerisinde olan tortu motor filtrelerinin daha kısa sürede tahribatına neden olmaktadır. Yakıt içerisindeki su ve tortular motor elemanları ve yakıt püskürtme sistemlerinde tıkanıklığa sebep olabilmektedir. Yakıt içerisindeki su ve tortular maksimum olarak %0,05 hacimsel oranda almalıdır (Ondruschat, 2020).

Dizel yakıtların içerisinde bulunan kükürtün yanması sonucunda SO_2 'ye dönüşmektedir. Oluşan SO_2 su ile tepkimeye girmesi sonucunda H_2SO_4 açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan H_2SO_4 yoğunlaşarak egzozda korozyona neden olmaktadır. Açığa çıkan SO_2 ve H_2SO_4 insan sağlığına ve çevreye çok zararlı emisyonlardır. Bu nedenden dolayı yakıt içerisindeki kükürt oranı ne kadar az olursa çevreye salınan SO_2 ve H_2SO_4 o oranda az açığa çıkmaktadır.

Alevlenme noktası yakıt buharının alev ile temas etmesi sonucunda yakıtın alevlendiği sıcaklıktır. Yakıtlarda alevlenme noktası sıcaklığının yüksek olması yakıtların taşınması ve depolanma özelliklerini kolaylaştırmaktadır.

Bulutlanma sıcaklığı sıvıların soğutulmasında ilk kristalleşmenin başladığı sıcaklığa denir. Yakıtların ilk olarak kristalleşmeye başlamadan önceki en düşük sıcaklık değerine akma noktası sıcaklığı denilmektedir. Yakıt sıcaklığı bu noktaların altına düştükçe yakıtın git gide katılaşmasına neden olarak yakıt akışının durmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklık noktalarının bilinmesi durumunda yakıtların soğuk ortam şartlarında çalışmasının uygun olup olunmadığı hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Knothe *et al.*, 1997).

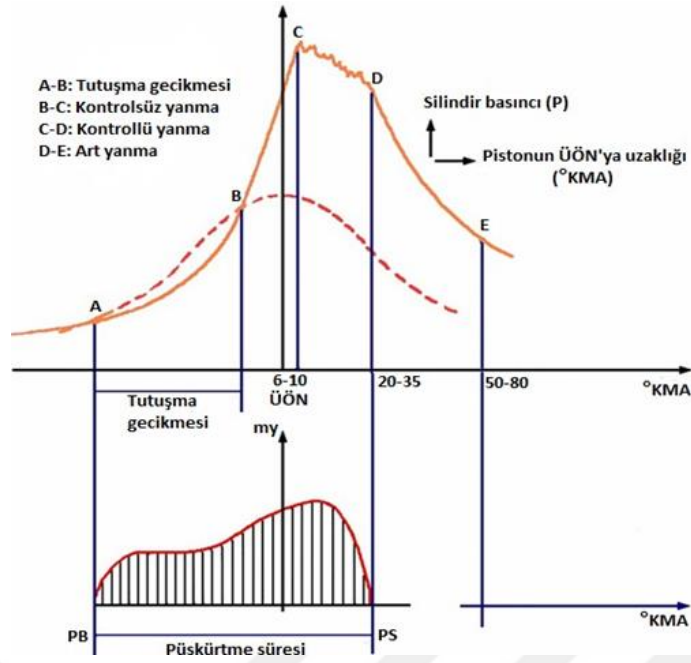
Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yakıtın en kısa zamanda tutuşabilmesi için setan sayısının yüksek olması gerekmektedir. Yani setan sayısı motorlarda tutuşa bilirliliği etkileyen bir parametredir. Yakıtın setan sayısı düşük ise yakıtın tutuşması gecikeceğinden yanma odasında toplanan yakıtın çok hızlı bir düzeyde yanması ve aşırı yüksek basınçlara çıkması durumunda motorlarda çok yüksek termal ve mekanik yüklerin tesirinde kalmasına neden olmaktadır. Bu duruma da motorlarda vuruntu denilmektedir (Safgönül, 1995).

Silindir içerisindeki dizel yakıtın yanması sonucunda açığa çıkabilecek enerjinin ölçüsüne ısı değeri denir. Yakıtların içerisinde bulunan hidrojen, kükürt ve oksijen gibi maddeler yakıtların ısı değerlerini belirtmektedir. Yakıt içerisindeki hidrojen miktarının artmasıyla ısı değeri de artış göstermektedir (Dağ C., 2013).

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Yanma Olayının Aşamaları

İçten yanmalı motorlar olan Sıkıştırma ile ateşlemeli ve Buji ile ateşlemeli motorlar, termodinamik çevrimler açısından yanma olayının gerçekleşme aşamaları birbirinden farklıdır.

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma olayı üç adımda gerçekleşmektedir. Yakıt yanma grafiğine bakıldığında en yüksek basınç noktasının yanma adımının ilk fazının bitiş noktasıdır. Grafiğe bakıldığında en yüksek sıcaklığın olduğu noktada yanmanın ikinci fazını ifade etmektedir. Son faz ise yavaş yanma fazının bitimi olup art yanma adımının başlangıcıdır (Altun Ş., 2005).



Şekil 2. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma diyagramı (Safgönlü, 1995)

Tutuşma gecikmesi (TG)

Tutuşma gecikmesi aşaması yakıtın yanma odasına püskürtülme aşaması ile yanma olayının başlaması arasındaki aşamadır. Yani püskürtme aşamasının başlamasıyla tutuşma aşamasına kadar olan gecikme zamanıdır. Hava yakıt oranı bu aşamanın süresini belirlemektedir. Bu süreyi etkileyen diğer etmenler ise yakıt kalitesi, sıcaklık, basınç ve yanma odasının şeklidir. Tutuşma gecikmesi aşaması süresinin kısılması basınç ve sıcaklık değerlerinin yüksek olmasına bağlıdır. Yanma odasında sıkıştırılan havaya yakıt püskürtüldüğünde ilk olarak hava/yakıt karışımının zengin olduğu bölgelerde yanma başlar ve hava/yakıt karışımının düşük olduğu bölgelerde yanma zengin olduğu bölgelere göre daha geç başlamaktadır. Yakıtın daha verimli bir şekilde yanması ve bu gecikme zamanının daha kısa sürede oluşması için sıkıştırılan havanın türbülanslı olması ve yakıtın homojen bir şekilde karışmış olması gerekir. Eğer bu zaman çok uzar ise silindirler içine normalden daha çok yakıt girmiş olacak ve ilk tutuşmadan sonra silindirlere dolan bu yakıtların kontrollsüz bir şekilde yanması gerçekleşecek ve bu da motorlarda vuruntuya sebep olacaktır (İlkılıç, 1999).

Şekil 2’de görüldüğü üzere A noktası ile B noktası arasındaki zaman dilimi tutuşma gecikmesi aşamasıdır. Şekildeki kesikli çizgiler basınç-krank açısını, tam çizgiler ise yakıt/hava karışımını göstermektedir.

Tutuşma gecikme aşaması süresinin uzun zamanlı oluşu hava /yakıt karışımının tam homojen olarak karışmadığının, tam karışımın oluşması için çok daha zaman olduğunun göstergesidir. Bu aşama süresince krank açısına gecikme açısı denilmektedir. Bu açının hesabı krank açısal hızının gecikme aşaması süresinin çarpılmasıyla bulunmaktadır. Püskürtülen yakıt

ile gecikme açısı yakıt pompasının krank miline bağılı olmasında dolayı doğru orantılı olarak artıp azalmaktadır.

Tutuşma gecikmesi aşamasının süresini basınç ve yüksek sıcaklık azaltmaktadır. Eğer yakıt yanma odasının her tarafına yani yanma odası duvarlarına kadar dağılırsa yanma odası duvarları da aşırı derecede sıcak olursa tutuşma gecikmesi aşamasının süresi daha çok kısalmaktadır.

Kontrolsüz yanma

Bu aşamada ateşleme gecikmesi aşamasında yanabilirlik sınırları içinde, yanma odası içinde hava ile yanma odası içine püskürtülen yakıtın çok hızlı bir şekilde yanmasından oluşmaktadır. Bu süre zarfında silindir basıncı artmaktadır. Bu aşamada dizel çevrimin en yüksek basıncı oluşmaktadır. Kontrolsüz yanma sonucunda açığa çıkan alevler yakıtta kimyasal değişimler meydana getirmektedir.

Kontrolsüz yanma aşamasındaki basınç yükselme hızı, tutunma gecikmesi süresiyle direkt olarak bağlantılıdır. Tutuşma öncesinde hava ile yakıt karışımının daha düşük oranda gerçekleşmesi ile tutuşma gecikmesi süresinin kısa olması ve motor çalışma devrinin de hava hareketlerini düşürecek şekilde seviyesinin düşük olması durumunda basınç yükselme hızı düşmektedir (Safgönül, 1995).

Kontrollü yanma

Yanma işleminin başlaması ile yanma odasına püskürtülen yakıtında yanma aşamasının bitmesiyle aradaki geçen zamana kontrollü yanma denilmektedir.

Yanma sırasında çok yüksek verim elde edilebilmesi için yanma olayının üst ölü nokta sınırında bitmesi gerekmektedir. Yanmanın son evresi olan kontrollü aşamada oksijenin yanmamış yakıt oranına oranının yüksek olması ve yakıt/hava karışımının çok hızlı ve homojen olması istenmektedir. Kontrollü yanma aşamasında yakıtın püskürtülme aşaması bitse bile istenmeyen bir durum sonucundaki püskürtme yanma aşamasının üçüncüsü olan kontrollü yanma aşamasının uzamasına neden olabilmektedir (İlkılıç, 1999) .

Art yanma

Yanma olayı da püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra da devam edebilmektedir. Yanma odasında yanma işlemi gerçekleşmemiş partiküllerin oksijen ile teması devam ettiği sürece yanma tepkimesi devam etmektedir.

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Zararlı Emisyonlar

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hidrokarbon içerikli yakıtların tam yakılması neticesinde ortaya yanma ürünleri çıkmaktadır. Bu ürünler H_2 , CO_2 ve havadaki N_2 'dir. Bu ürünlerin dışında hava/yakıt karışım oranının düşük olması ve düşük yanma sıcaklığından dolayı hava kirliliğine sebep olan PM, SO_x , NO_x , CO, HC ve yağ atıkları açığa çıkmaktadır (Prasad & Bella, 2010).

Partikül maddeler (PM)

İçten yanmalı motorların ürettiği katı taneciklerini is oluşturmaktadır. İs hava miktarının yetersiz olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ortaya çıkan difüzyon alevinde, genel olarak hidrojenin karbona oranla oksijene karşı daha aktif olmasından dolayı yanmanın tamamlanması için zaman ve özellikle oksijenin bulunmadığı durumlarda is oluşacaktır. Yanma odasında bulunan is tanecikleri yeterli oksijen, zaman ve sıcaklık bulamadığı durumlarda egzozdan çevreye salınmaktadır. Genellikle is oluşumu dizel yakıtın yanmasının bir aşamasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşmuş olan büyük bir kısmı tekrardan yanmaktadır (Gonzalez Gomez *et al.*, 2000).

Azot Oksit (NO_x)

Azot oksitler (NO_x) de CO gibi kanda bulunan hemoglobinle birleşmektedirler. Azot oksitler yanma sonucunda, aşırı yüksek yanma sıcaklıklarında ve serbest oksijen ortamında oluşmaktadır. İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki sıcaklığın 1800K'nin üzerine çıkması sırasında havanın içerisinde bulunan oksijen ve azot kimyasal olarak birleşmektedir. Kimyasal bağ olarak birleşim sonucunda açığa azot oksitler çevreye ve insan sağlığına son derece zararlı bir gazdır (Haşimoğlu, 2000).

Karbonmonoksit (CO)

CO renksiz, kokusuz ve çok zehirli bir gazdır. Yanma ürünleri içerisinde CO molekülünü içermesin önemli sebebi ise yanma odası içerisinde oksijenin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar genellikle düşük karışım ölçülerinde çalışmaktadırlar.

Kükürtdioksit (SO_2)

SO_2 sert kokulu ve renksiz bir gazdır. Bitki örtüsü ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Dizel yakıtın içinde yaklaşık olarak % 0,5 oranında kükürt bulunmaktadır. Havanın içerisinde bulunan O_2 molekülü ile birleşmesi sonucunda SO_2 molekülünün

oluşmasına sebep olmaktadır. Kükürt oranında önemli bir faktörlerden biride dizel yakıtın kalitesidir (Kelen, 2014).

Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbonlar genellikle kokuları kötüdür. Oldukça tahriş edici maddelerdir ve 150 den fazla türü vardır. Oksijenin ve sıcaklığın yetersiz olmasından kaynaklı olarak yakıtın tam yanamaması sonucunda HC'ler oluşmaktadır. Motorlarda bulunan HC emisyonu tam yanma olmayan bölgelerden gelmektedir.

Biyodizel

Dünya üzerindeki hızlı nüfus artışına bağlı olarak kullandığımız enerjide o oranda artmaktadır. Dünya enerjisinin büyük bir çoğunluğunu fosil kökenli enerji kaynaklarından karşılamaktadır. Fakat hızlı nüfus artışı ve sanayileşmenin hızlı olarak büyümesi sonucunda ileriki yüzyıl içinde fosil kökenli enerji kaynak rezervlerinin büyük bir oranda azalacağı öngörülmektedir. Bunun sonucunda ülkeler farklı alternatif yakıt türü araştırma hareketlerine yönelmiştir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin fosil kökenli yakıt rezervlerinin hızlı nüfus artışına bağlı olarak ileriki yüzyılda azalacağından dolayı alternatif yakıt türü olan biyolojik kökenli yakıtların kullanılması önem kazanmıştır (Barnwal & Sharma, 2005).

Biyodizel, hayvansal ve bitkisel yağların transesterifikasyon tepkimesine uğratılması sonucu açığa çıkmaktadır. Bu tepkime sonucunda yağ molekülleri katalizör ve metil alkolün etkisiyle yağ asidinin metil esterlerini oluşturmaktadır. Bu tepkimenin sonucunda açığa çıkan biyodizelin özellikleri dizel yakıt özelliklerine oldukça benzerdir.

Biyodizel yakıtının biyolojik kökenli olması, emisyon seviyelerinin düşük olması ve yenilenebilir bir yakıt türü olması ve dizel yakıt özelliklerine benzer olmasından dolayı dizel yakıt türü olarak kullanılabilir.

Biyodizel belli oranlarda dizel yakıt ile karıştırılarak sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda hiçbir değişiklik yapmadan kullanılabilir. Biyodizel ile dizel yakıtın karıştırılması ile oluşan karışım yağlanma özelliği sayesinde motor elemanlarının uzun zaman diliminde çalışmasını sağlamaktadır.

Biyodizel ile dizel yakıt karışımları içerisindeki biyodizel yüzdesine bağlı olarak adlandırılmaktadır. Bu karışımlar Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Biyodizel-Dizel Yakıt Karışım Oranları

Nu.	Örnek Adı	Biyodizel (%)	Dizel (%)
1	B100	100	0
2	B80	80	20
3	B60	60	40
4	B40	40	60
5	B20	20	80

Biyodizelin Üretiminde Kullanılan Hammadde Kaynakları

Biyodizel kullanımında en çok tercih edilen hammadde kaynağı bitkisel yağlar ve bitkisel atık yağlardır. Bu hammadde kaynaklarının yanında bakteriler, algler ve hayvansal yağlarda hammadde kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu tür hammadde kaynaklarının kullanılabilirliği değerlendirilirken yağın kalitesi ve maliyet açısından değerlendirilmesi göz önüne alınmaktadır.

Biyodizelin kimyasal özellikleri dizel yakıtla karşılaştırıldığında oldukça yakın özellikte olduğu görülmektedir. Biyodizel üretiminde kullanılan birçok yağ türünün yapıları birbirine benzemektedir. Bunun nedeni ise yağların yapı taşı olan yüksek oranda trigliserinlerden oluşmasıdır (Koç, 2011).

Fosil rezervlerinin dışında her ülkenin bitkisel yağ kaynakları bulunmaktadır. Bu bitkisel kaynaklı yağlar biyodizel üretiminde kullanılması sağlanmalıdır. Biyodizelin üretiminde kullanılan hammadde kaynağı olan bitkisel kökenli yağlar palm, soya, ayçiçeği, kolza ve pamuk tohumu yağlarıdır. Biyodizel üretiminde kullanılan tüm hammadde kaynakları Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Biyodizel Üretiminde Kullanılan Hammadde Kaynakları (S. P. Singh, 2010)

Biyodizel Üretiminde Kullanılan Yağlar			
Bitkisel Yağlar	Yenilemeyen Yağlar	Hayvansal Yağlar	Diğer Kaynaklar
Soya	Badem	İç yağlar	Algler
Kolza	Kauçuk	Domuz Yağı	Bakteriler
Ayçiçek	Babassu	Kanatlı hayvan	Mikro algler
Buğday	Somon Yağı	Balık	Mantarlar
Hindistan cevizi	Cumara		
Sorgum	Defne Yağı		
Pamuk	Tütün		
Yer fıstığı			
Pirinç			
Keten			
Aspir			
Susam			
Palm			

Türkiye’de Biyodizel Üretim Potansiyeli

Biyodizel ile ilgili ülkemizdeki ilk çalışma Atatürk tarafından 1934 yılında Atatürk Orman Çiftliği’nde bitkisel kaynaklı yağların tarım traktörlerinde bir yakıt türü olarak kullanılması yönünde çalışmalar yapılmıştır. İlk yapılan çalışmadan uzun bir süre sonra Bursa’da bir işletmede 1998 yılında üretime başlanmıştır. Fosil kökenli kaynakların tükenmesi, petrol fiyatındaki artışlar ve ülkemizin enerji ihtiyacının %70’ini ithal etmesinden dolayı ülkemizin alternatif enerji türlerine yönelmemiz gerektiğini göstermektedir. Ülkemiz tam kapsamıyla biyodizel üretimine 2000’li yıllarda başlamıştır (Sabancı *et al.*, 2006). Ülkemizde biyodizel üretiminin yapıldığı yerler Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. Türkiye’de biyodizel üretiminin yapıldığı iller

Biyodizel üretimindeki maliyetin çoğunluğu biyodizel üretiminde kullanılan hammaddelerin teminidir. Yapılan vergi uygulamalarından sonra ülkemizde biyodizel üretimi bir nebze durmuştur. Bunu nedeni ise biyodizel üretiminin yapılan vergiler ve maliyetleri karşılamaması olmuştur. Bu konu hakkında bazı çalışmaların veya önlemlerin alınması gerekmektedir. Çünkü bu yaptırımların sonucunda birçok yatırımcı biyodizel üretim lisanslarını iptal ettirmek zorunda kalmıştır. Tablo 4’te Türkiye’deki üretim tesisleri sayısı ve yıllık üretim kapasiteleri verilmiştir.

Tablo 4. Türkiye’deki Biyodizel Üretimin Sayısı ve Kapasiteleri

	Üretim Yapan Firma Sayısı	Kapasite (Ton/Yıl)
İzmit	7	160645
Gaziantep	16	158004
Ankara	11	71040
Mersin	4	70534
Adana	7	58745
Bursa	5	46062
İzmir	6	35588

Tablo 4 incelendiğinde Türkiye’deki toplam üretim yapan firma sayısı 56’dır. Toplam üretilen yıllık kapasite ise 600618 tondur. En çok üretim yapan firma sayısı Gaziantep olmasına rağmen yıllık üretimi 160645 ton kapasitesinde en yüksek olan il İzmit’tir. En düşük üretim kapasitesi sahip il ise İzmir’dir.

Biyodizelin Teknik Özellikleri

Biyodizelin formül içeriği C16-C18 orta uzunluktaki yağ asidi zincirlerinin etil ya da metil esterlerinden oluşmaktadır. Yakıt olarak kullanılacak biyodizelin oksijen içermesi dizel yakıttan farklı olduğunu açıklamaktadır. Fakat Tablo 5’te biyodizel ve dizel yakıt özellikleri karşılaştırılması incelendiğinde dizel ve biyodizel yakıt özelliklerinin benzer olduğu ve özellik değerleri arasında çok farkların olmadığı görülmektedir (Ulusoy & Alibaş, 2002).

Tablo 5. Biyodizel ve Dizel Yakıt Özelliklerinin Karşılaştırılması (Ulusoy & Alibaş, 2002)

Yakıt Özellikleri	Birim	Sınır Değeri	Biyodizel	Dizel
Kapalı Formülü			$C_{19}H_{35.2}O_2$	$C_{12.226}H_{23.29}S_{0.0575}$
Molekül Ağırlığı	g/mol		296	120-320
Özgül Ağırlığı	kg/L	0.875-0.90	0.87-0.88	0.82-0.86
Kinematik Vizkozite	mm ² /s	2-4.5	4.3	2.5-3.5
Tutuşma Katsayısı	Setan sayısı	49-...	>55	49-55
Alevlenme Noktası	°C	55-...	>100	>55
Su Miktarı	mg/kg	...-200	<300	<200

Toksik etki

Biyodizel yakıtının toksik etkisi bulunmamaktadır. Biyodizelin ağız yoluyla insan vücuduna alınması sonucunda öldürücü etkisi 17,4 g biodizel/kg şeklindedir. Bu değer tuzun yenmesi sonucundaki öldürücü etkisinin yaklaşık olarak 10 katıdır. Biyodizelin toksik etki

içermemesine rağmen biyodizel ve dizel yakıt karışımları kullanılması durumunda, dizel yakıt kullanımı sırasındaki standart koşullar ne ise biyodizel karışımı kullanılması halinde de o standartlar geçerlidir.

Biobozunabilirlik

Biyodizelin temelini oluşturan metil veya etil esterler doğada çok hızlı bir şekilde bozunabilme özelliğine sahiptir. Olumsuz bir açıdan mikrobiyolojik etkiyi 10000 mg/L'ye kadar göstermemektedirler. Biyodizel ve dizel yakıt suya bırakıldığı zaman 28 gün içinde biyodizelin %95 'i, dizel yakıtının ise %40 su içinde bozunmaktadır.

Soğukta akış özellikleri

Biyodizelin ve dizel-biyodizel yakıt karışımlarının bulutlanma ve akma noktaları dizel yakıta göre oldukça yüksektir. Bu durum sonucunda biyodizel yakıtının veya karışımlarının soğuk çalışma koşullarında kullanılması durumunda sorunların ortaya çıkacağını açıklamaktadır. Bu sorunların giderilmesi için yani akma ve bulutlanma noktası değerlerinin düşürülmesi için uygun katkı maddelerin kullanılması gerekmektedir.

Depolama

Biyodizelin depolanması karanlık, kuru ve temiz bir ortamda depolanmalı ve alevlenme sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta depo edilmelidir. Biyodizel yakıtının alevlenme noktasının dizel yakıtından yüksek oluşu taşınması ve depolanması dizel yakıtından oldukça güvenlidir. Depolama yapılan tankın malzemesi paslanmaz çelik veya polietilen olmalıdır.

Biyodizel Yakıt Özellikleri

Biyodizelin kimyasal yapısı dizel yakıtlara göre farklıdır. Biyodizelin çok iyi bir polar çözücü özelliğinden dolayı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımı sırasında motor elemanlarının biyodizelin bu özelliği sayesinde çözülmeyecek özelliğe sahip motor elemanı maddeleri ile değiştirilmesi veya başka bir önlem alınması gerekmektedir (Ölçüm, 2006).

Biyodizel yakıtı veya biyodizel-dizel yakıt karışımlarının sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımı sırasında herhangi bir değişikliğe gidilmeden sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılabilir.

Biyodizel-dizel yakıt karışımları sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılması sonucunda daha iyi verimli bir yanam gerçekleşerek dizel yakıta göre daha düşük emisyon değerleri elde edilmektedir.

Biyodizel yakıtının alevlenme noktası dizel yakıtı göre yüksek olmasından dolayı biyodizelin depolanması veya taşınması dizel yakıtı göre oldukça güvenlidir.

Biyodizel yakıtının dizel yakıtı göre setan sayısının yüksek olması sıkıştırma ile ateşlemeli motorların daha sessiz çalışmasına ve daha yüksek verimli yanmanın gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Biyodizelin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda uzun süreli çalıştırılması sonucunda biyodizel iyi bir yağlanma özelliği göstermektedir.

Biyodizelin alevlenme noktası ve akma noktasının dizel yakıtından yüksek olması sonucunda soğuk çalışma koşullarında sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda bazı sıkıntılar çıkabilmektedir. Bu sorunların giderilmesi için saf biyodizele veya biyodizel-dizel yakıt karışımlarına belli oranlarda katkı maddeleri karıştırılması gerekmektedir (Uzun, 2018).

Biyodizel Üretim Yöntemleri

Biyodizelin 4 farklı üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar piroliz, mikroemülsiyon oluşturma, seyreltme ve en çok kullanılan yöntem olan transesterifikasyon yöntemleridir.

Piroliz yöntemi

Piroliz yönteminin asıl amacı kimyasal bağların kırılarak daha küçük moleküller oluşturulması işlemidir. Bitkisel yağların pirolizi için iki yöntem vardır. Bunlar standart olan ASTM distolasyonu ile ısı parçalanmanın gerçekleşmesi ve diğeri ise bitkisel kökenli yağların ısı etkisiyle bir kapta parçalanması yöntemleridir. En çok kullanılan yöntemin standart ASTM distolasyonu ile ısı parçalanma işlemidir. Bunun nedeni ise açığa çıkan biyodizelin dizel yakıt özelliklerine daha çok benzemesinden dolayıdır.

Mikroemülsiyon oluşturma yöntemi

Bitkisel kökenli yağların viskoziteleri oldukça yüksektir. Bu bitkisel kökenli yağların kullanılması için viskozitelerinin düşük olması gerekmektedir. Viskozite değerlerini düşürmek için etanol veya metanol ile mikroemülsiyon oluşumu sağlanmaktadır. Bunun sonucunda bitkisel kökenli yağların viskozitesi düşmektedir.

Mikroemülsiyon oluşumu su ve yağ gibi birbirleri içerisinde karışmayan iki sıvının yüzey aktif madde yardımıyla çok küçük çapta sıvı damlacıklarının çözünemeyen başka bir sıvı içine dağıtılmasıyla oluşturmaktadır.

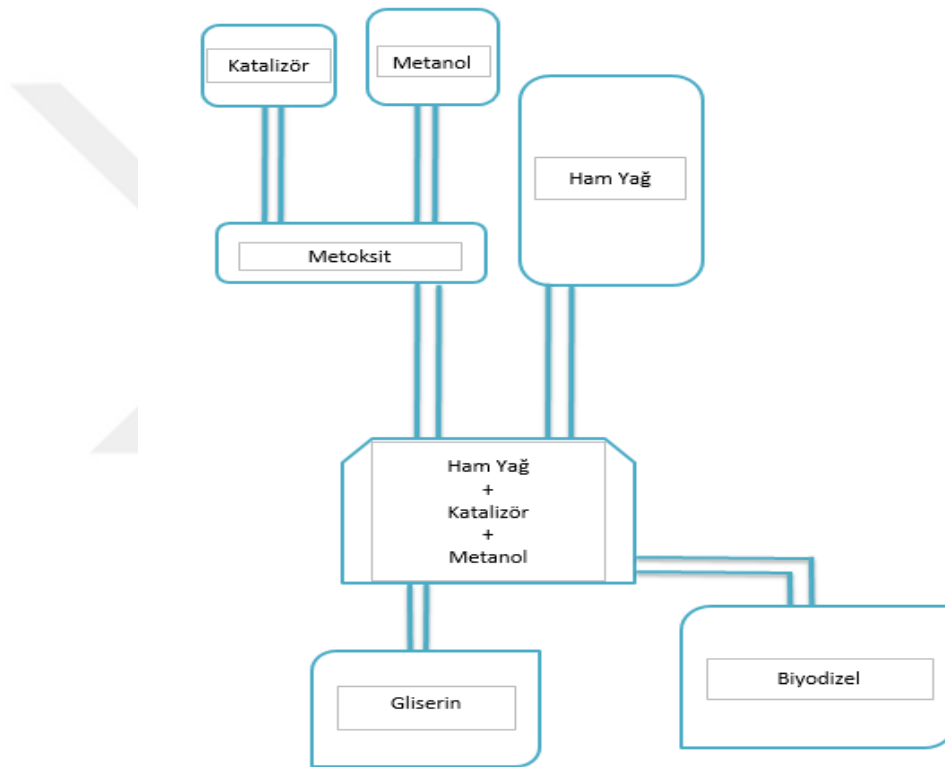
Seyreltme yöntemi

Seyreltme yöntemi açığa çıkan atık ve bitkisel yağların bir çözücü veya bir dizel yakıtla tamamen karıştırılıp inceltilmesidir. Bu işlem sayesinde yağların dizel yakıt ile karıştırılarak

atık ve bitkisel yağların viskozitesinin düşürülmesini ve dizel yakıtın birleşim oranını azaltmasını sağlamaktadır. Örnek olarak B80,B50,B40,B30,B20 şeklindedir. Bu yöntemde en çok kullanılan yağlar; ayçiçeği, kolza ve yer fıstığı yağlarıdır (Eryılmaz, 2014).

Transesterifikasyon yöntemi

Transesterifikasyon işlemi metanol veya etanol olan bir alkol ile bitkisel kökenli bir yağın katalizör vasıtasıyla reaksiyona girmesi sonucunda gliserin ve yağ asidi alkol esterlerini oluşturması işlemidir. Açığa çıkan yağ asidi alkol esterlerine biyodizel denilmektedir. Biyodizel üretim yöntemlerinden en çok kullanılan yöntem bu yöntemdir. Yöntemin işlem şeması Şekil 4'te gösterilmektedir (Fukuda *et al.* 2001).

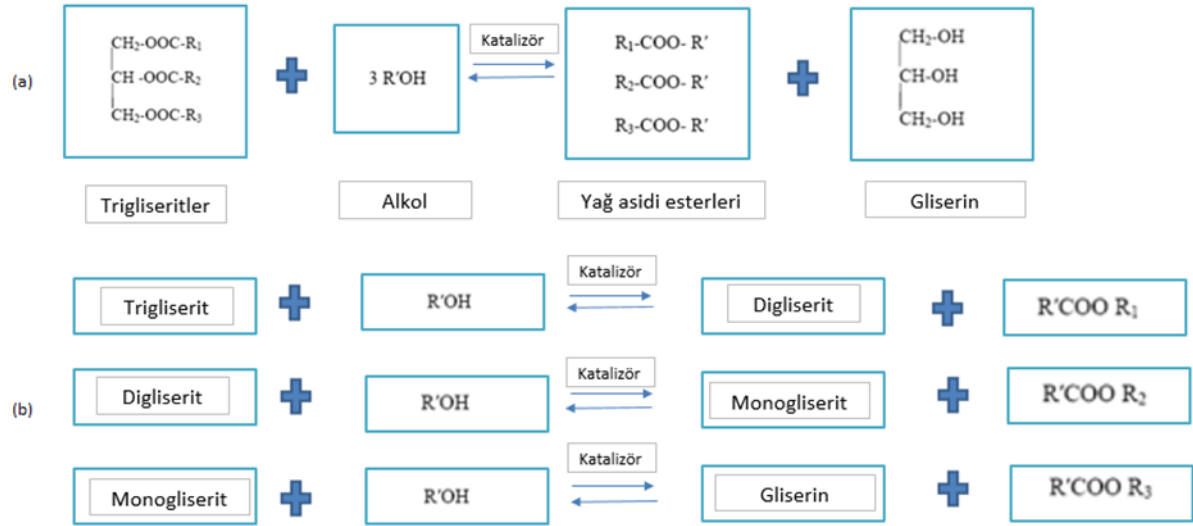


Şekil 4. Transesterifikasyon İşlem Şeması (Fukuda *et al.* 2001)

Alkol ve katalizörün karıştırılması işlemi: Transesterifikasyon yönteminin ilk aşaması katalizör (sodyum metilat, NaOH) bir karıştırıcı kullanılarak metil veya etil alkol içinde çözünmesi sağlanır.

Reaksiyonlarda kullanılan alkoller butanol, metil ve etil alkollerdir. Bu alkoller arasında en çok kullanılan alkol etil ve metil alkollerdir. Etil alkolün çevresel denge içerisinde biyolojik açıdan daha kabul edilebilir olması ve tarımsal ürünlerden elde edilebilir olmasından dolayı metil alkol ile karşılaştırıldığında avantajlı olmasına rağmen metil alkolün daha ucuz olması ve kısa alkol zincirlerine sahip olmasından dolayı daha avantajlıdır.

Reaksiyon aşaması: Bu aşamada ise kapalı bir reaksiyon kabına hayvansal veya bitkisel yağ konulur ve tepkime oluşumu için kaba konulan yağ 55 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Daha sonrasında ısınmış yağ üstüne katalizör/alkol karışımı dökülerek karıştırılır. Tepkimenin gerçekleşme süresi 1-2 saat arasında sürmektedir. Gerçekleşen tepkime basamakları Şekil 5'te gösterilmektedir. Tepkimede ilk olarak trigliseritler diglisertlere, diglisertlerde monogliseritlere ve monogliseritlerde gliserine dönüşmektedir. Her gerçekleşen tepkime sonucunda bir tane ester molekülü açığa çıkmaktadır.



Şekil 5. Trigliseritlerin Alkol ile Transesterifikasyonu (a) Genel Denklem, (b) Tersinir Basamak Reaksiyonları (Fukuda *et al.* 2001)

Reaksiyon sonucunda açığa çıkan fazların ayrılması işlemi: Reaksiyonun tamamlanmasının ardından açığa çıkan ürünlerin ayrışması için separatörlere alınır. Separatöre alınan ürün karışımları sonucunda belli bir zaman bekledikten sonra yoğunluk farkından dolayı biyodizel üstte kalır ve gliserin ise dibe çökmektedir. Alt tarafa çöken gliserin alt taraftan tahliye edilir. Eğer tahliye edildikten sonra biyodizel içinde tekrardan bir miktar gliserin kalması durumunda gliserinin giderilmesi için karışım 30-35 °C ılık su ile yıkanarak gliserinin suyla temas etmesi sonucunda suya buharlaşması sağlanır ve tekrardan dibe çöken gliserin kabın alt tarafından tahliye edilir. Bunu sonucunda kabın içerisinde sadece biyodizel kalması sağlanır.

Ayrışan gliserin ve biyodizelden alkolün uzaklaştırılması: Biyodizel ve gliserin fazlarının ayrılması işleminin ardından biyodizel ve gliserinin içinde kalan alkollerin destilasyon veya flaş buharlaştırma yöntemiyle uzaklaştırma işlemidir.

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Biyodizel Yakıtı Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda biyodizel yakıtı kullanımının avantajları

- Biyodizelin oksijen oranının yüksek olması sebebiyle dizel yakıtı göre daha verimli bir yanma gerçekleşmektedir.
- Alevlenme noktasının dizel yakıtı göre yüksek olması, biyodizel taşınmasını ve depo edilmesini dizel yakıtı göre daha güvenli hale getirmektedir.
- Dizel yakıtı göre CO₂ emisyonu daha düşüktür. Bunun sonucu olarak sera etkisine neden olmamaktadır.
- Biyodizel yakıtı kullanımında biyodizel/dizel yakıtı karışımında biyodizel yakıtı oranının dizel yakıtı oranından küçük olduğu durumlarda biyodizelin sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlarda kullanılırken motorlarda herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek yoktur.
- Çevreci ve yenilenebilir bir yakıtı türüdür.
- İçerisinde aromatik ve kükürt içermemektedir.
- Biyodizen yağlanma özelliğinin olması motor verimini arttırmaktadır.

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda biyodizel yakıtı kullanımının dezavantajları

- Dizel yakıtı göre düşük bir ısı değeri olmasından dolayı motor gücünde bir nebze düşüşe neden olabilmektedirler.
- Soğuk çalışma koşullarında biyodizellerin viskoziteleri yükselmektedir ve soğuk iklim koşullarında katkı maddesi konulmadan kullanılamamaktadır.
- Emisyon açısından dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında NO_x emisyonları biraz yüksek çıkmaktadır.
- Dizel yakıtı göre yakıtı tüketimi artmaktadır.
- B100 kullanılması durumunda sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda bazı değişimlerin yapılması gerekmektedir (Yaşar, 2019).

Biyodizelin Alternatif Yakıt Olarak Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorlarda Kullanımı

Bitkisel kaynaklı yağla yapılan motor deneyleri sonucunda bitkisel kaynaklı yağların biyodizel yakıtına dönüşümü yapılmadan da acil durumlarda yakıt olarak kullanılabileceği ispatlanmıştır. Bu yapılan deneyler sonucunda bitkisel kökenli yağların yakıt olarak kullanımı sırasında sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda enjektörlerde tıkanma ve motor yağının seyrilmesi gibi bazı olumsuzluklara sebebiyet vermektedir. Bu olumsuzlukların giderilmesi

için bitkisel kaynaklı yağların yakıt özelliklerinde bir iyileştirilme yapılması gerekmektedir(Alptekin, 2005) .

Biyodizelin sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda herhangi bir değişim yapılmadan direk olarak kullanılması biyodizel yakıtının yaygın bir biçimde kullanımına etki etmektedir. Biyodizel yakıtının alevlenme sıcaklığı dizel yakıtın alevlenme sıcaklığından oldukça yüksektir ve bu nedenden dolayı dizel yakıtı göre taşınması ve depo edilmesi daha güvenlidir. Biyodizelin uzun süreli sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımı sırasında yağlayıcılık özelliğinden dolayı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda aşınmaları azaltarak motor ömrünün uzatılmasında etkili olmaktadır (Teresa L. Alleman, 2016).

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda biyodizel yakıtının kullanılması sırasında dizel yakıt kullanımına göre g, moment ve yakıt tüketimi gibi motor performans özelliklerinde çok aşırı bir değer değişimi oluşmamaktadır. Emisyon açısından ise HC ve CO emisyonlarında aşırı bir azalma görülmektedir. Fakat NO_x ve CO₂ emisyonlarında artış görülmektedir.

Biyodizelin kullanımı sırasında CO₂ emisyonu açısından iyi değerler vermektedir. Dizel yakıt kullanımındaki CO₂ emisyon değerine göre, B100 kullanılmasıyla %78, B20 kullanılması sırasında ise %15,66 oranında CO₂ emisyon değeri azalacağı kanıtlanmıştır (Teresa L. Alleman, 2016).

Trafo Yağları

Trafo yağları elektrik tesisat sistemlerinden bir tanesi olan trafolarda kullanılmaktadır. Trafolar ekirdek ve bobin kısımindan oluşmaktadır. Trafoların çekirdeğinde sac plakalar ve bobin kısmında ise alüminyum veya bakır teller bulunmaktadır. Trafolarda bulunan bu malzemelerin elektrik akımı sırasında çok ısınması trafo veriminin düşmesine ve trafodaki yapı elemanlarının tahribatına neden olabilmektedir. Trafo yağlarının trafolarda kullanılmasının nedeni sistemlerin izolasyonunu yani çalışmakta olan ısınan sistemin soğutulmasına katkı sağlamaktadır. Trafo yağları bu tür elektrik sistemlerinde yalıtım yağı görevi görmektedir.

Trafo yağlarının zellikleri;

- Trafonun soğutulmasına sağlamak
- Trafolardaki elektrik kaçaklarının yalıtımını sağlamak
- Trafo içerisindeki malzemelerin, korozyon oluşumuna karşı korunmasını ve ısınmasını önlemek

Trafo yalıtım yağlarının asıl görevi; ısı transferi ile ısınmış olan sistem elemanlarının soğutulmasını sağlamak ve elektrik kaçaklarının yalıtımlarını sağlamaktır. Bir diğer görevi ise trafo elemanlarında açığa çıkan elektrik kıvılcımlarını sönmülemektir. Trafo yağlarının sayesinde transformatörlerde aşırı ısınmadan veya bazı ark oluşumları neticesinde arıza gazları ortaya çıkmaktadır ve bu gazlar trafo yağlarının içinde çözünerek trafolarda oluşan arızalar hakkında bilgi edinmemizi sağlamaktadır (MEB, 2011).



Şekil 6. Trafo yağı

Trafo Yağı Çeşitleri

Trafo yağları iki çeşitten oluşmaktadır. Bunlar;

- Naftenik Trafo Yağları
- Parafinik Trafo Yağları

Naftenik trafo yağları

Bu tür trafo yağları ham yağlardan üretilmiştir ve içerisinde mum ve az miktarlarda parafin bulunmaktadır. Bu yağların içerisindeki mum oranının az olmasından dolayı parafinik trafo yağlarına göre akma noktaları düşüktür. Kaynama noktaları bu yağların ortalama 425 °C ‘dir. Trafolarda açığa çıkan zararlı gazlar bu tür trafo yağlarının içinde çözünebilmektedir. Parafinik trafo yağıyla karşılaştırıldığında daha kolay paslanma veya aşınma eğilimindedirler. Bu tür yağlar -40°C ve daha düşük sıcaklıklara düştüğü zaman içerisinde aromatik bileşikler içerebilmektedir.

Parafinik trafo yağları

Bu tür trafo yağları ham yağlardan üretilmiştir ve içerisinde naftenik trafo yağlarına göre yüksek miktarlarda n-parafin olan mum içermektedir. Bu yağların içerisindeki mum oranının yüksek olmasından dolayı naftenik trafo yağlarına göre akma noktaları yüksektir. Kaynama noktaları bu yağların ortalama 530 °C ‘dir. Trafolarda açığa çıkan zararlı gazlar bu tür trafo

yağlarının içinde çözünmemektedir. Naftenik tip trafo yağları parafinik tip trafo yağları ile karşılaştırıldığında daha kolay bir şekilde korozyona uğramasına rağmen trafo yağında açığa çıkan oksidasyon ürünlerinin yağ içinde çözünmesi bu tür problemin azalmasına neden olmaktadır.

Atık Trafo Yağları

Trafo yağları yüksek sıcaklıktaki çalışma koşullarında ayrışır ve içerisindeki nem yağın yaşlanmasına neden olmaktadır. Trafoların bazı oluşum elemanları ve içerisinde bulunan bazı metaller trafo yağına zarar vermektedir. Trafo yağlarının ömrünün dolması veya kısılması içerisinde bulunan asitlerin ve aromatik bileşiklerin oluşumlarına neden olan oksidasyondur. Trafo yağları uzun süre oksitleyici atmosfer içinde elektriksel veya termal bir zorluğa uğradığında oksitlenip bozunurlar ve asitlikleri artar. Bunun sonucunda trafo yağları çamur oluştur ve trafo yağının kullanım ömrünün dolmasına neden olmaktadır. Trafo yağlarındaki bu çamur oluşum rengine göre trafo yağlarının hasar tespiti yapılmaktadır. Renk değişimi uzun zaman dilimi sonunda açığa çıkmaktadır. Bu renk değişimi görsel testi ASTM D 1524-84'e göre yapılmaktadır.

Atık trafo yağları kaynak ve güç amaçlı kullanılan trafolardan açığa çıkan atık yağlardır. Bu açığa çıkan yağlar dizel yakıtı benzer özellikler göstermektedir. Atık trafo yağı diğer atık yağlarla karşılaştırıldığında en uygun olan atık yağ konumundadır. Çünkü bunun nedeni yıllık olarak yüksek miktarlarda atık trafo yağı açığa çıkmaktadır. Atık trafo yağlarının çok oluşu çok fazla sayıda transformatörlerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda açığa çıkan atık trafo yağlarının ileriki yıllarda değerlendirilmesi daha çok önem kazanacaktır (Behera *et al.*, 2014).

Yakın geçmiş zamanlarda transformatörlerden açığa çıkan atık trafo yağlarının bir alternatif yakıt türü olarak yeniden kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır ve halen günümüzde yapılmaktadır. Trafo yağları ark söndürme, yalıtım ve transformatörlerdeki malzemelerin aşırı ısınmasını önlemek için soğutma işlemlerinde kullanıldıktan sonra belli bir zaman sonra atık haline gelmektedir. Türkiye’de açığa çıkan atık trafo yağı miktarı yılda 2000-3000 ton aralığında olduğu hesap edilmektedir (Anonim, 2012).

Bu atık trafo yağlarının yüksek ısı değerlerinde olması ve dizel yakıtı benzer özellikler sergilemesinden dolayı bu tür atık yağlar üzerinde bazı iyileştirmeler yapılması sonucunda tek başına bir yakıt türü olarak veya dizel yakıt ile belirli oranlarda karıştırılarak sıkıştırma ile ateşlemedi motorlarda alternatif bir yakıt türü olarak kullanılması veya değerlendirilmesi çok önemlidir .

Atık Trafo Yağlarının Özellikleri

- Berrak, tortusuz ve temiz olmalıdır.
- Trafo yağı açık sarı rengine olmalıdır.
- Trafo yağının 15 °C ‘deki yoğunluğunun 0,895 kg/dm³ ‘te olması gerekmektedir.
- Çok düşük çalışma koşullarında dayanabilmeli ve katılaşmamalıdır.
- Trafo yağının yanma noktasının çok yüksek olması gerekmektedir.
- Vizkozitesinin yani akıcılığının iyi olması gerekmektedir.
- Trafoların soğutulmasını sağlaması için yağların kinematik viskozitesi iyi olmalıdır.
- Oksidasyona karşı dayanıklı olmalıdır.
- Yağların delinme gerilimleri oldukça yüksek olmalıdır.

Atık Trafo Yağlarının Tekrardan Kullanılabilmesi İçin Yapılan İyileştirmeler

Atık trafo yağı içinde çözünebilen veya çözünemeyen kirliliklerin, kimyasal veya fiziksel süreçlerden geçirilerek yok edilmesi veya azaltılması işlemleridir. Atık trafo yağlarının bu işlemlerden geçirilip eski özellik değerlerine gelmesine rağmen oksidasyon dirençleri yeni trafo yağlarından oldukça çok düşüktür. Atık trafo yağlarını iyileştirme yöntemleri oldukça pahalı bir yöntemdir. Bundan dolayı açığa çıkan atık trafo yağından bir miktar alınıp laboratuvar ortamında deneme çalışması yapıldıktan sonra geri dönüştürülebilir olup olunmadığının analizi yapıldıktan sonra tamamının rejenerasyon işlemi yapılmasına karar verilmektedir.

Atık trafo yağlarının geri kazanılması veya iyileştirme yöntemleri şunlardır;

- Süzme Yöntemi
- Temas Yöntemi
- Yeniden Arıtma Yöntemi

İlk olan süzme yönteminde transformatörlerde bulunan alt vananın açılmasıyla transformatör içinden alınan yağ ilk olarak belli dereceye kadar ısıtılmaktadır. Daha sonrasında alınan bu yağı katkı maddeleri ve partiküllerden ayırmak için bir filtreden geçirilir. Filtreden geçirilen yağ tekrardan transformatörlerde bulunan kazana dökülür. Bu işlem birkaç kez tekrar edildikten sonra içerisindeki kirler temizlenmektedir. Son aşamada ise yağ içinde bulunan su ve gazların dışarı atılmasını sağlamak için yağların tasfiye cihazından geçirilmesi gerekmektedir.

İkinci yöntem olan temas yöntemi ile iyileştirmede, iyileştirme oranı trafo yağlarının içindeki kil miktarı oranına bağlı olarak, trafo yağının kirlenme oranına göre belirlenir. Temas

yöntemiyle iyileştirme sadece çok aşırı miktarlardaki kirlenmiş yağların temizlenme işleminde kullanılmaktadır.

Son yöntem olan yeniden arıtma (rafinasyon) yönteminde trafo yağlarının ilk üretimi aşamasında yapılan yeniden arıtma yöntemi uygulanmaktadır. Bu işlemler sadece yağ üretimi yapılan yerlerde yağ üretim rafinerisinde yapılabilmektedir ve oldukça çok pahalı bir yöntemdir (MEB, 2011).

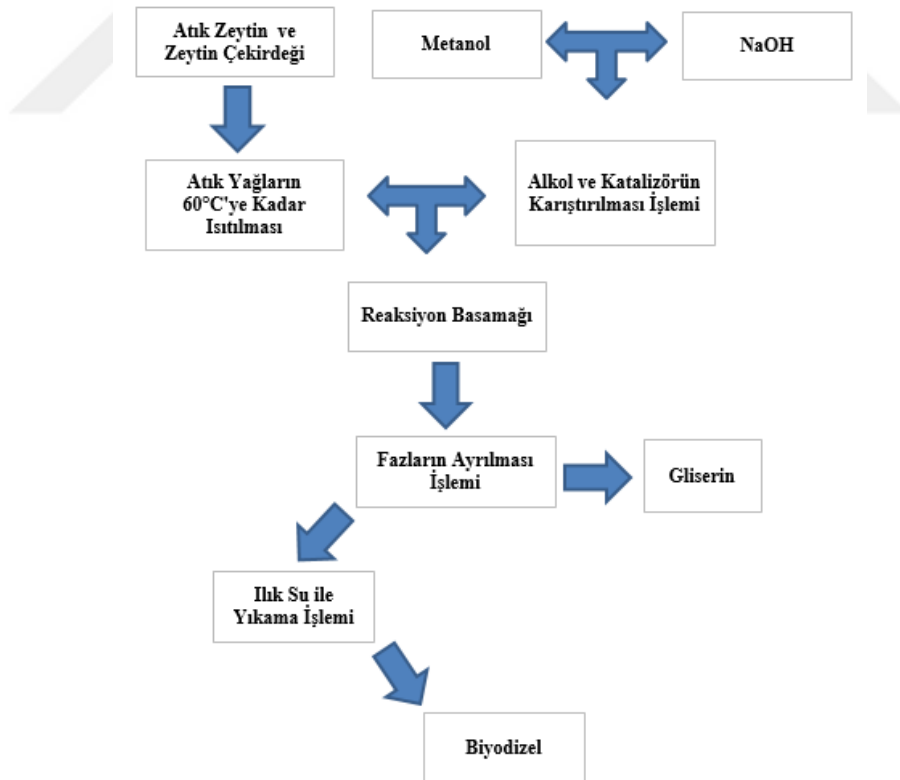


MATERYAL VE METOT

Tezin bu bölümünde bitkisel atık yağlardan biyodizel üretmek için kullanılan yöntem ve aşamaları hakkında bilgilere yer verilmiştir. Üretilen biyodizel ile atık trafo yağı ve euro dizel (D100) yakıt karışımlarının belirli oranlarda hazırlanması ve elde edilen yakıt karışımlarının motor performansı ve egzoz emisyon değerleri için gerçekleştirilen testler ve deney düzeneği ile ilgili bilgilere ve motor performansı değerlerinin hesaplanma yöntemlerine ait bilgilere yer verilmiştir.

Bitkisel Atık Yağlardan Transesterifikasyon Yöntemiyle Biyodizel Üretimi

Transesterifikasyon yöntemi metanol ile bitkisel kökenli bir yağın katalizör vasıtasıyla reaksiyona girmesi sonucunda yağ asidi alkol esterlerini (biyodizel) ve gliserini oluşturma işlemidir. Transesterifikasyon yönteminin aşamaları Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu işlemler, Atatürk Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Kimya laboratuvarında gerçekleştirildi.



Şekil 7. Transesterifikasyon yönteminin aşamaları

Transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretiminde katalizör olarak Sodyum Hidroksit (NaOH), alkol olarak metanol (CH_3OH) kullanılmıştır. Sodyum Hidroksit (NaOH)

ve metanolün (CH_3OH) bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 6’da gösterilmiştir. Bu yöntemde bitkisel atık yağ olarak Şekil 8’de gösterilen zeytinyağı ve zeytin çekirdeği yağı kullanılmıştır.

Tablo 6. Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Metanolün (CH_3OH) Bazı Özellikleri

Özellik	NaOH	CH_3OH
Molekül ağırlığı	39,9771 g/mol	32,04 g/mol
Yoğunluk (15°C)	2,13 g/cm ³	0,792 g/cm ³
Kaynama noktası	1388°C	64,7°C
Erime noktası	323°C	-97,6°C
pH Değeri	13,5	7
Safılık	99%	99,50%



Şekil 8. Atık zeytin ve çekirdeği yağı

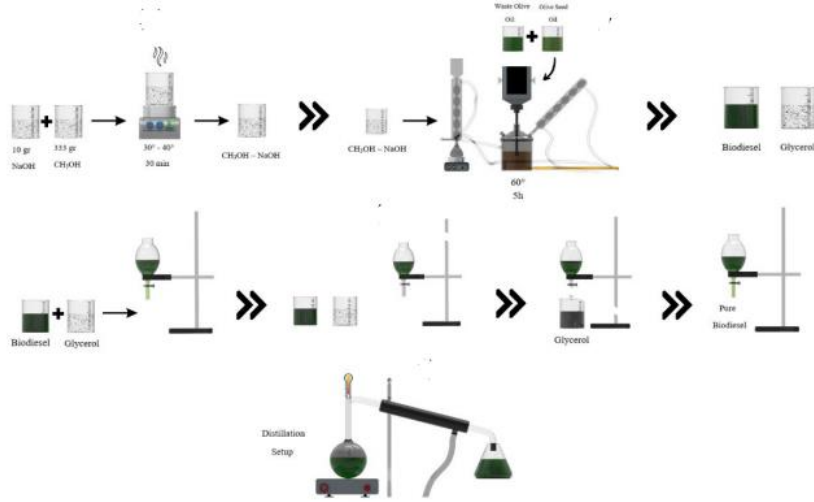
Alkol ve Katalizörün Karıştırılması İşlemi

Transesterifikasyon yönteminin ilk aşaması katalizör olarak kullanılan 10 gram sodyum hidroksit (NaOH) bir karıştırıcı kullanılarak cam bir reaktör içinde bulunan 333 gram metil alkol içinde $30\text{-}40^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve 30 dakika kadar bir sürede tamamen çözünmesi sağlandı. Karışım sonucunda CH_3OH - NaOH çözeltisi oluşturuldu.

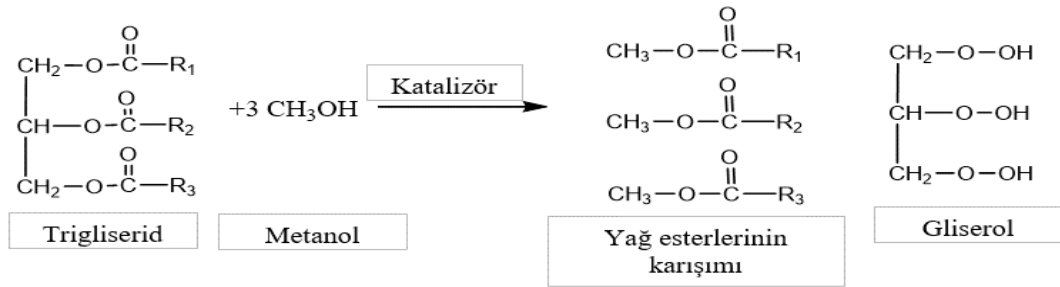
Reaksiyon aşaması

Bu aşamada ise kayıp olmasın diye geri soğutucu takılı bir cam reaktöre atık zeytinyağı ve zeytin çekirdeği yağı konuldu. Tepkime oluşumu için cam reaktöre konulan atık yağlar 60°C 'ye kadar ısıtıldı. Daha sonrasında ısıtılan bitkisel atık yağlar ve katalizör/alkol (CH_3OH -

NaOH) karışımı ile iki boyunlu bir cam reaktörde ve geri akış sistemine dökülerek karıştırılması sağlandı. Reaksiyonun gerçekleşmesi 60°C'de 5 saat sürdürüldü. Gerçekleşen tepkimenin deney düzeneği Şekil 9'da gösterilmektedir. Gerçekleşen reaksiyon tepkimesi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Transesterifikasyon yöntemi deney düzeneği



Şekil 10. Transesterifikasyon yönteminin reaksiyon denklemi

Reaksiyon sonucunda açığa çıkan fazların ayrılması işlemi

Reaksiyonun tamamlanmasının ardından açığa çıkan ürünlerin ayrışması için separatörlere alınır. Separatöre alınan ürün karışımları sonucunda oda sıcaklığında belli bir zaman bekledikten sonra yoğunluk farkından dolayı biyodizel üstte kaldı ve gliserin ise dibе çöktü. Alt tarafa çöken gliserin alt taraftan tahliye edildi. Fakat biyodizel içinde tekrardan bir miktar gliserinin kaldığı görüldü ve bu durumunda gliserinin giderilmesi için karışım 30-35 °C ılık su ile 2 kez yıkanarak gliserinin suyla temas etmesi sonucunda suya buharlaşması sağlandı ve tekrardan dibе çöken gliserin kabın alt tarafından tahliye edildi. Bunu sonucunda kabın içerisinde sadece biyodizel kalması sağlandı.

Ayrışan gliserin ve biyodizelden alkolün uzaklaştırılması

Biyodizel ve gliserin fazlarının ayrılması işleminin ardından biyodizel ve gliserinin içinde kalan metil alkollerin destilasyon yöntemiyle uzaklaştırması gerçekleştirildi. Açığa çıkan biyodizel (B100) Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Transesterifikasyon sonucu üretilen biyodizel (B100)

Atık Trafo Yağının Temin Edilmesi

Deneyde alternatif yakıt üretimi karışımlarında biri olan atık trafo yağı TEİAŞ Erzurum Bölge Müdürlüğü’nden temin edilmiştir. Temin edilen atık trafo yağı (T100) Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Deneyde kullanılan atık trafo yağı

Temin edilen atık trafo yağı deneyde kullanılmadan önce içerisindeki su ve tortudan arındırılmıştır ve deneyde kullanımı için hazır hale getirildi. Daha sonrasında atık trafo yağı üretilen biyodizel ile birlikte dizel yakıt ile Tablo 7’de verilen oranlara göre deney numunesi karışımları hazırlanmıştır.

Biyodizel, Euro Dizel, Atık Trafo Yağı ve Yakıt Karışımlarının Hazırlanması

Deney çalışmasında kullanılacak olan yakıt karışım numuneleri Tablo 7’de verilen % hacim oranlarına göre karıştırılmıştır. Yakıt karışımları hazırlanırken tüm yakıt türleri bir filtreden geçirilmiştir.

Tablo 7. Biyodizel, Atık Trafo Yağı ve Euro Dizel Yakıt Karışım Miktarları ve Oranı

Numune No	Numene Adı	Atık Trafo Yağı (%)	Euro Dizel (%)	Biyodizel (%)	Atık Trafo Yağı (ml)	Euro Dizel (ml)	Biyodizel (ml)
1	D100	0	100	0	0	3200	0
2	TD30	30	70	0	960	2240	0
3	TD30B10	30	70	10	864	2016	320
4	TD30B20	30	70	20	768	1792	640
5	TD30B30	30	70	30	672	1568	960

Karışımlar oluşturulurken yakıt karışımının biyodizel oranları toplam hacimlerin %10, %20 ve %30 oranını kapsıyacağı şeklinde numuneler oluşturulmuştur. Yakıt karışımlarında atık trafo yağı ve Euro dizel yakıt oranı ise örnek olarak deney numunesi 3'te olduğu gibi hacimce %10 biyodizel iken geriye kalan hacimce %90'lık yakıt karışım oranının %30'u atık trafo yağı ve %70'i ise Euro dizel yakıttan oluşmaktadır. Numunelerdeki Euro dizel yakıtının genel hacme oranı deney numune sırasına göre %100, %70, %63, %56 ve %49'dur. Görüldüğü üzere yakıt karışımlarındaki Euro dizel yakıt oranının yüksek tutulmasıyla motor deneylerinin vuruntusuz bir yanma oluşumu sağlanarak motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'te atık trafo yağı, biyodizel ve Euro dizelden hazırlanan 5 yakıt karışımı görülmektedir.

**Şekil 13.** Atık trafo yağı, biyodizel ve euro dizel yakıtları ve karışımları

Biyodizel, Euro Dizel, Atık Trafo Yağı ve Yakıt Karışımlarının Karakterizasyonu

Biyodizel, dizel, atık trafo yağı ve üçlü yakıt karışımların bazı fizikokimyasal özellikleri (yoğunluk, kinematik viskozite, akma ve bulutlanma noktası) ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarına göre test edilmiştir. Ayrıca zeytin çekirdeği atık yağından üretilen biyodizelin yağ asiti kompozisyonu da belirlenmiş ve yapılan bu analizler ile ilgili ayrıntılar Tablo 8' de verilmiştir.

Tablo 8. Örneklerin Karakterizasyonunda Kullanılan Ekipmanlar ve Yöntemler

	Ekipman	Marka, model
Yoğunluk (15°C'de)	Automatic density meter	Rudolph Research Analytical, DDM 2909
Kinematik Viskozite (40°C'de)	Digital constant temperature kinematik viscosity bath	Koehler KV4000 series
Bulutlanma Noktası	Cloud and Pour Point Bath	SETA (11010-2)
Akma Noktası	Cloud and Pour Point Bath	SETA (11010-2)
Yağ Asidi Bileşimi	Gas chromatograph (GC) system equipped with an auto-injector	SHIMADZU, QP 2010 and the RESTEK Rtx-Wax capillary column (60 m × 0.25 mm id., 0.25)
Fourier Dönüşümü Kızılötesi (FTIR) Analizi	FTIR spectrophotometer	Bruker VERTEX 70v
TG /DSC Analizi	Simultaneous Thermal Analyzer	Netzch STA 409

Gaz kromatografi (GC) yardımıyla biyodizelin yağ asiti kompozisyonu belirlenirken, başlangıç fırın sıcaklığı 5 dakika için 140°C'dir. Daha sonra fırın sıcaklığı 3°C/dakika hızında 240°C'ye yükseltilmiş ve bu sıcaklıkta, 17 dakika korunmuştur. FTIR analizi 4000-400cm⁻¹ aralığında yapıldı.

TG/DSC analizi 10°C/dak ısıtma hızında ve 25-600°C aralığında hava ortamında yapılmıştır.

Biyodizel içeren üçlü yakıt karışımlarının asit değerleri ise, KOH-etanol çözeltisi kullanılarak titrasyon metodu ile belirlenmiştir. Numunelerden 5-10 g tartılmış ve bir erlen içerisinde dietil eter ile çözülmüştür. Erlenin içerisine 3-4 damla fenolftalein indikatörü koyulduktan sonra etanol içerisindeki 0,1 N KOH çözeltisi ile pembe renk elde edilinceye kadar titre edilmiştir. Kaydedilen sarfiyat miktarı kullanılarak, asit değeri formül 1 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Asit değeri} = \frac{V \times 5.61}{m} \text{ mgKOH/g(örnek)} \quad (1)$$

Burada, V, titrasyon sırasındaki sarfiyattır (mL) ve m, numunenin kütlesidir (g).

Deneyde kullanılan atık trafo yağı, Erzurum Shell Petrol'den alınan Euro dizel yakıt ve üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarında tespit edildi. Araştırma bulguları ve tartışma kısmında irdelendi.

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Test Motorun Özellikleri, Performansı ve Emisyonları

Motor deneyleri, Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Motorlar Laboratuvarında yapılmıştır. Deneyde kullanılan motor sıkıştırma ile ateşlemeli, dört zamanlı, tek silindirli ve hava soğutmalı Antor (4 LD 820) markalı bir motor

kullanılmıştır. Hazırlanan yakıt numunelerinin bu motorda kullanılabilir olup olunmadığı test edilmiştir. Test sırasında motorda vuruntu olmaması yani yanmanın verimli bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Bunun sonucunda hazırlanan yakıt karışımlarının sıkıştırma ile ateşlemeli motorda kullanılması sırasında ve sonrasında motor performans ve egzoz emisyon sonuçları incelenmiş ve deney numuneleri birbirleri arasında bu özellikler karşılaştırılmıştır ve analiz edilmiştir. Yapılan motor deneyleri sonucunda motor performans ve emisyon ölçümleri araştırma bulguları ve tartışma kısmında irdelenmiştir.

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Özellikleri ve Kontrol Ünitesi

Deney sıkıştırma ile ateşlemeli, dört zamanlı, tek silindirli ve hava soğutmalı Antor (4 LD 820) markalı bir motor kullanılarak motor performans ve egzoz emisyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Motor tüklerini veya devir sayılarını ayarlanabilmesi için sıkıştırma ile ateşlemeli motor ile su fren dinamometresi bağlantısı yapılmıştır. Motorun hızını(dev/dk) ,torkunu (Kgm) ve fren gücünü (kW) Ölçmek için elektronik kontrol ve ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan elektronik kontrol paneli Şekil 14’de gösterilmiştir. Elektronik kontrol ünitesinin motor hızı ve fren gücü ölçüm hassasiyetleri sırasıyla ± 5 dev/dak ve $\pm 0,5055$ ’dir.



Şekil 14. Elektronik kontrol paneli

Hazırlanan yakıt karışımı yakıt deposuna döküldükten sonra vana ile kontrolü sağlanan bir boru ile 50 ve 100 mililitrelik şiber vana ile kontrolü sağlanan cam yakıt büretinden (Şekil 15) geçirilmiştir. Yakıt büretinden geçirilen 50 mililitrelik yakıt numunesinin sıkıştırma ile ateşlemeli deney motorunda yakılma süresi telefon kronometresi ile her numune için 2 defa ölçüm yapılarak ölçüm hata oranının düşürülmesi amaçlanmıştır.

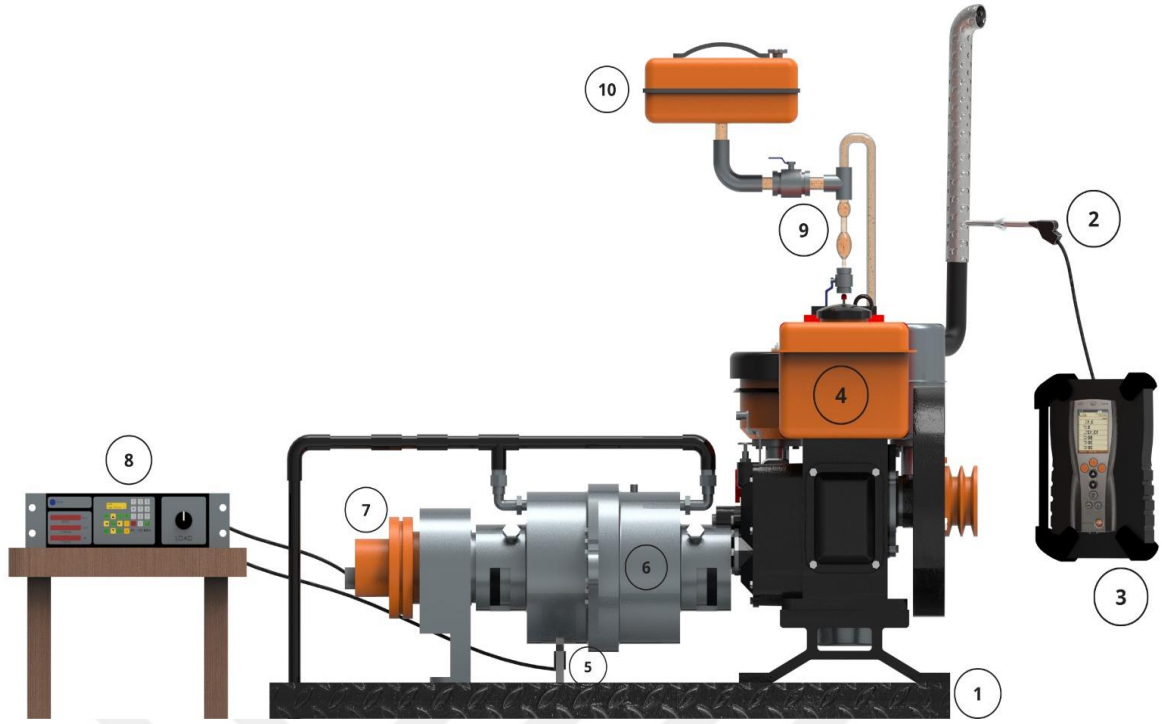


Şekil 15. Yakıt büreti ve deposu

Deney numunelerinin motor testleri gerçekleştirilmeden önce her deney numunesinden önce motorun istikrarlı çalışır duruma getirilmesi için Euro dizel (D100) yakıt ile birkaç dakika çalıştırılmıştır. Şekil 16’da Sıkıştırma ile ateşlemeli test motoru ve dinamometresi gösterilmiştir. Şekil 17’de ise sıkıştırma ile ateşlemeli motorun test düzeneğinin şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 16. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motoru ve dinamometresi



1) Motor şasesi	2) Egzoz gazı analiz probu	3) Egzoz gazı analizatörü
4) Sıkıştırma ile Ateşlemeli motor	5) Yük hücresi	6) Dinamometre
7) Devir saati	8) Elektronik kontrol ünitesi	9) Yakıt büreti
10) Yakıt deposu		

Şekil 17. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunun deney düzeneği

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda motor performans ve emisyon analizi sonuçlarını incelemek ilk olarak test motoru 3000 dev/dak'da Euro dizel yakıt (D100) ile birkaç dakika çalıştırılarak motor testlerinin gerçekleştirilmesi için gereken çalışma sıcaklığına çıkarıldıktan son deneyler gerçekleştirilmiştir. Her numunenin deneyinin gerçekleşmesi Euro dizel (D100) yakıtında olduğu gibi test motorunun uygun çalışma sıcaklığına gelene kadar beklenmiştir. Her bir deney numunesi için motor performans ve egzoz emisyon değerleri 2 kere tekrarlanmıştır ve ortalama değerleri alınmıştır. Deneyler ilk olarak motorun kararlı hale gelebilmesi için 3000 dev/dak'da çalıştırıldıktan sonra su freni dinamometresinin kullanılmasıyla test motoruna uygulanan yük artırılmıştır. Bunun sonucunda motor devirleri sırasıyla 2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak'ya düşürülerek deney verileri ölçülmüştür. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunun teknik özellikleri Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Sıkıştırma ile Ateşlemeli Test Motorunun Özellikleri

Motor Modeli	Antor 4 LD 820
Motor Tipi	Dört Zamanlı
Yakıt Tipi	Dizel
Çap	102 mm
Strok	100 mm
Süpürme Hacmi	817 cm ³
Sıkıştırma Oranı	17:01
Soğutma Tipi	Hava Soğutmalı
Maksimum Motor Hızı	3000 rpm
Maksimum Güç	12,7 kW ve 3000 rpm
Maksimum Tork	50 N.m ve 1600 rpm
Enjeksiyon Basıncı	20 MPa
Özel Yakıt Tüketimi	255 g/kW. h ve 2800 rpm
Motor Konumu	Dikey

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Emisyonları ve Egzoz Emisyon Ölçüm Cihazı

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda açığa çıkan egzoz emisyonlarının (CO, NO, NO_x ve egzoz gazı sıcaklığı) ölçülmesi için Testo 350 egzoz gazı analizörü kullanıldı. Testo 350 Şekil 18’de görüldüğü üzere cihaz gövde, kontrol ünitesi ve probdan olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Bu cihaz karbon monoksit, azot oksit ve kükürt dioksit emisyonlarını %10 hassasiyetle, azot dioksit emisyonunu ise %5 hassasiyetle ve egzoz gazı sıcaklığını ise ± 1 °C hassasiyetindedir. Cihazın egzoz gazı ölçümü teknik özellikleri Tablo 10’da gösterilmiştir. Sıkıştırma ile ateşlemeli test motoru her deney numunesinde motor çalışma sıcaklığına ulaştığı zaman egzoz emiyon ölçüm probu egzoz borusuna açılan deliğe yerleştirildi. Yerleştirilen prob ile emisyon değerleri ölçüldü ve bu ölçüm 2 kez tekrarlandı. Ölçüm sonuçları ölçüm cihazına kaydedildi ve bütün numunelerin deney işlemleri gerçekleştikten sonra cihazın yazıcısından ölçüm sonuçları yazdırıldı. Elde edilen sonuçlar 2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak için alınan ölçüm değerleri araştırma bulguları ve tartışma kısmında irdelendi.

**Şekil 18.** Testo 350 egzoz emisyon ölçüm cihazı

Tablo 10. Testo 350 Egzoz Gazı Emisyon Ölçüm Cihazı Özellikleri

Parametre	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0-10000 ppm	±10 %
SO ₂	0-5000 ppm	± 10 %
NO	0-4000 ppm	±10 %
NO _x	0-500 ppm	± 5 %
Egzoz Gazı Sıcaklığı (°C)	-200- +1370 °C	±1 °C

Testo 350 egzoz emisyon ölçüm cihazı O₂, CO, CO₂, SO₂, HC, NO ve NO_x emisyonlarını ölçebilmektedir. Açığa çıkan atık gaz miktarının artmasıyla otomatik olarak cihaz kendi ölçüm aralığını yükseltmektedir. Bu özelliği sayesinde ölçülen emisyon değerleri yüksek bir oranla doğru sonuç vermektedir. Cihazın Ölçümleri saat ve tarihe göre otomatik olarak değerleri kaydetmesiyle deney numunelerinin ölçüm değerleri karıştırılmamaktadır. Her deney numunesinin egzoz emisyonlarına bakılırken cihaz belli bir süre bekletildikten sonra egzoz gazı emisyonlarına bakılmıştır. Bu sayede cihazın yanlış değerler okuması önlenmiştir.

Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorun Performansı ve Hesaplamaları

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda motor performansı ve özellikleri her deney yakıt numuneleri için 4 farklı devir sayısında (2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak) gerçekleştirildi. Alınan deney yakıt numunelerinin Tork (T) , Fren Gücü(BP) ve Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC) gibi performans parametreleri incelendi ve araştırma bulguları ve tartışma bölümünde irdelendi.

Tork

Bir motorun krank mili tarafından üretilen döndürme kuvvetidir. Bir motor ne kadar fazla tork üretirse, iş yapma yeteneği o kadar artmaktadır. Torkun formülü ise 2 'deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$T = F \times d \quad (2)$$

T: tork (Nm),

F: uygulanan kuvvet (N),

d: rotorun merkezinden metre (m) cinsinden mesafeyi göstermektedir.

Fren gücü

Sıkıştırma ile ateşlemeli motor tarafından sağlanan ve su fren dinamometresi tarafından emilen fren gücü formül 3'teki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$BP = \frac{2 \times \pi \times \omega \times T}{1000} \quad (3)$$

BP: fren gücü (kW),

T: tork (Nm),

ω : açısal hızı (dev/sn) ifade etmektedir.

Fren özgül yakıt tüketimi

Motorun çalışma anında tükettiği birim değerindeki yakıt miktarının oluşan motor gücüne oranının g/kW.h biriminden değeri özgül yakıt tüketimini vermektedir. Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) formül 4 ile hesaplanmaktadır.

$$BSFC = \frac{m_f}{BP} \times 10^3 \quad (4)$$

BSFC: Fren özgül yakıt tüketimi (g/kW.h),

m_f: Yakıt kütle debisi (kg/h),

BP: fren gücü (kW)

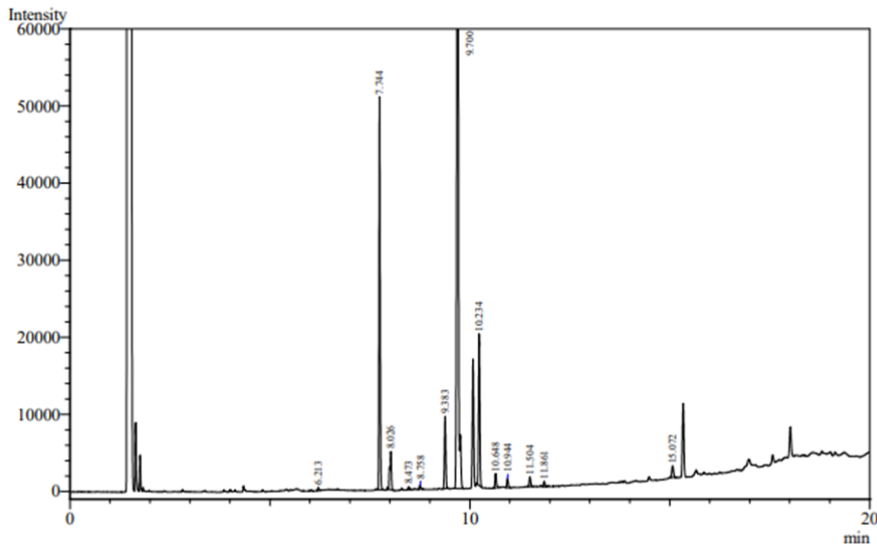
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Hazırlanan Yakıt Karışımlarının Kimyasal ve Fiziksel Özellik Analizleri

Bu başlık altında gaz kromatografi, numunelerin yakıt özellikleri, FT-IR ve TG/DSC analizlerinin sonuçları incelenmiştir.

Gaz kromatografi analizi

Zeytin çekirdeği atık yağından üretilen biyodizel numunesinin yağ asiti metil ester kompozisyonu gaz kromatografi (GC) yardımıyla analiz edilmiştir. Şekil 19’da biyodizel numunesinin gaz kromatogramını ve Tablo 11’de biyodizel numunesindeki ana bileşiklerin listesini göstermektedir. Buna göre, atık zeytin çekirdeği yağından üretilen biyodizel, hem doymuş (palmitik asit C16:0, stearik asit C18:0) hem de doymamış (oleik asit C18:1, linoleik asit C18:2, palmitoleik asit) FAME'ler den oluşmaktadır. Biyodizel numunesinin çoğunlukla doymamış yağ asitleri içermesi, onun bitkisel yağ kökenli olmasındandır. En yüksek oranda, doymamış bir yağ asiti olan oleik asit (yaklaşık %70) bulunmaktadır. Zeytinyağı oleik asit bakımından zengin bir kaynaktır (Abdelrahman *et al.*, 2019). Bu nedenle zeytinyağı kökenli biyodizelde oleik asit yüzdesinin yüksek olması beklenen bir durumdur. Bilindiği gibi, yüksek oranda yağ asitleri içeren biyodizelin yağ asidi profili, onun yoğunluk, viskozite, akma noktası ve bulutlanma noktası gibi önemli yakıt özelliklerini etkilemektedir (Bedir & Doğan, 2021).



Şekil 19. Biyodizel numunesinin GC spektrumu

Tablo 11. Atık Zeytin Çekirdeği Yağından Üretilen Biyodizelin Yağ Asidi Metil Ester Kompozisyonu

Yağ Asidi Metil Ester Bileşimi	Konsantrasyon (% ağırlık)
Stearik Asit (C18:0)	3,45
Oleik Asit (C18:1n9c)	68,78
Linoleik Asit (C18:2n6c)	7,46
Palmitik Asit (C16:0)	14,92
Palmitoleik Asit (C16:1)	2,26
Diğer	3,13

Numunelerin yakıt özelliklerinin analizi

Biyodizel, dizel, atık trafo yağı ve yakıt karışımlarının bazı fizikokimyasal özellikleri incelendi ve elde edilen sonuçlar Tablo 12’ de verildi.

Tablo 12. Yakıt Numunelerinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri

Yakıt özelliği	D100	TD30	TD30B10	TD30B20	TD30B30	T100	B100	Europe EN 14214	ASTM D 6751
Yoğunluk, g/cm ³	0,8323	0,8456	0,8519	0,8541	0,8621	0,8765	0,9124	0,86 -0,9	0,575-0,90
Kinematik Viskozite, mm ² /sn	3	4,3	5,2	5,5	5,8	10,6	34,1	3,5-5,0	1,9-6,0
Bulutlanma Noktası, °C	2	-5	-16	-14	-11	-20	4	-	-3 to + 12
Akma Noktası, °C	-35	≤ -40	-24	-22	-20	≤ -40	-8	-	-15 to + 10
Asit Değeri, mgKOH/g	-	-	2,06	3,48	5,49	-	19,51	<0,5	<0,8

Yakıt yoğunluğu, motorun performansını etkileyen önemli yakıt özelliklerinden birisidir. Yakıt enjeksiyon sistemleri yakıtı hacim bazında ölçtüğü için, yoğunluğa bağlı olarak daha fazla ya da daha az yakıt kütlesi enjekte edilir (Bukkarapu & Krishnasamy, 2021). Tablo 12 incelendiğinde, B100 haricindeki tüm numunelerin yoğunluklarının 0,8300-0,8800 aralığında değiştiği ve tüm değerlerin ASTM standartlarına uyduğu görülmektedir. En yüksek yoğunluğa sahip olan zeytinyağı kökenli B100’ün yoğunluğu (0,9124) her iki standart aralığının biraz üstündedir. Bu değer zeytinyağı kökenli biyodizel için beklenen bir değerdir (Plasquy *et al.*, 2021).

Kinematik viskozite, yakıtın akma kabiliyetini gösteren önemli bir yakıt özelliğidir. Yüksek viskozite, yakıtın akışkanlığını azalttığı için yakıt enjeksiyon ekipmanının çalışmasını ve sprey atomizasyonunu olumsuz etkileyecektir (Atabani *et al.*, 2020). Tablo 12’ de görüldüğü

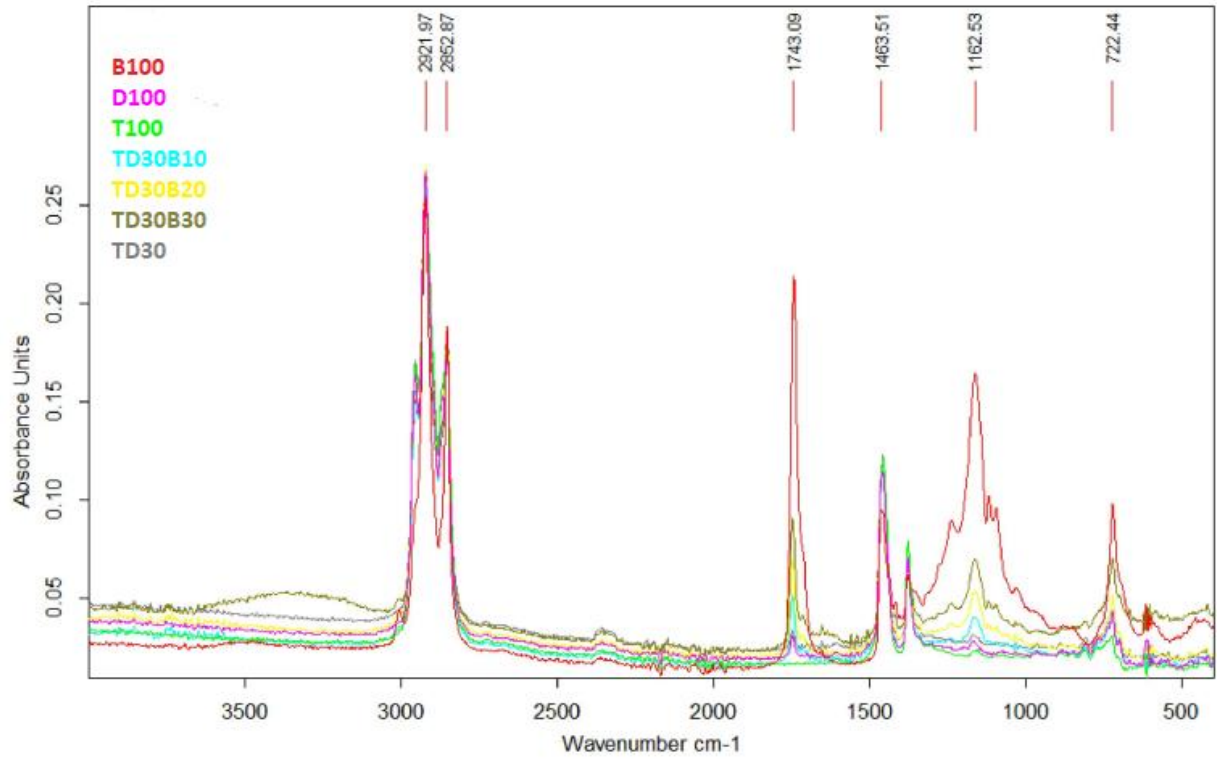
gibi, T100 ve B100 haricindeki tüm numunelerin kinematik viskozite değerleri, 3-5,8 mm²/sn aralığında değişmekte olup standartları karşılamaktadır. T100' ün ve B100'ün kinematik viskozite değerleri sırasıyla 10,6 mm²/sn ve 34,1 mm²/sn'dir. Bu değerler standart aralıkların dışında olmakla birlikte aynı zamanda da oldukça da yüksektir. Atık trafo yağlarının viskozitelerinin yüksek olması nedeniyle onların dizel yakıtla farklı oranlarda karıştırılarak kullanıldığı bilinmektedir (Mohta & Basavaraj, 2015). Yine zeytinyağı kökenli olan biyodizel numunesinin yüksek viskozitesi beklenen bir durumdur. Benzer sonuçlar Ayadi *et al.*, 2021'in çalışmasında da elde edildi (Ayadi *et al.*, 2021).

Bulutlanma ve akma noktası yakıtların en önemli soğuk akış özelliklerindendir. Bulutlanma noktası soğuma sırasında yakıtta ilk katı kristallerin oluştuğu sıcaklıktır. Bu sıcaklıkta yakıt filtrelerini tıkama potansiyeline sahip bulutlu bir süspansiyon oluşmaya başlar. Akma noktası ise, soğumanın devam etmesi ile birlikte yakıtın jelleşmesi için çözeltide yeterli miktarda wax'ın oluştuğu sıcaklıktır. Bu sıcaklıkta yakıt artık pompalanamaz bir hale gelir (Al-Samarae *et al.*, 2017). Tablo 12' de görüldüğü gibi, kinematik viskozitesi en yüksek olan B100'ün bulutlanma (+4°C) ve akma noktasının (-8°C) çok düşük sıcaklıklar olmadığı görülmektedir. D100, T100 ve TD30 numunelerinin akma noktaları, sırasıyla -35°C, ≤ -40°C, ≤ -40°C' dir ve bu sıcaklıklar oldukça düşük sıcaklıklardır. Ancak, farklı oranlarda biyodizel karıştırılan üçlü yakıt karışımlarının (TD30B10, TD30B20, TD30B30) biyodizel oranının artmasıyla, bulutlanma ve akma noktalarının yükseldiği görülmektedir. Bu durum, B100'ün kötü soğuk akış özelliklerinin onunla karıştırılan üçlü yakıt karışımlarını da kötü yönde etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Akma ve bulutlanma noktası için standart aralık belirtilmediği için, tüm numuneler, uygun kabul edilebilir.

Yüksek asit değeri korozyonu artırır ve yakıtlarda istenmeyen bir durumdur. Biyodizel yapısı gereği yağ asitleri içermektedir (Dharma *et al.*, 2019). Bu çalışmada ise B100'ün asit değerinin 19,51mgKOH/g gibi çok yüksek bir değere sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, biyodizelle karışım yapılan numunelerin (TD30B10, TD30B20, TD30B30) asit değerlerinin, karışımdaki biyodizel oranının artmasıyla arttığı ve asit değerlerinin standart aralıkların çok üstünde olduğu görülmektedir (Tablo 12) . Bu durumda yine B100'ün çok yüksek asit değerinden kaynaklanmaktadır.

FT-IR analizi

Biyodizel (B100), dizel (D100), atık trafo yağı (T100) ve onların karışımlarının kızılötesi spektrumları Şekil 20' de gösterilmektedir.



Şekil 20. Biyodizel (B100), euro dizel (D100), atık trafo yağı (T100) ve karışımlarının kızılötesi spektrumları

Buna göre, tüm numunelerin 2921cm^{-1} , 2852 cm^{-1} ve 1463 cm^{-1} piklerini verdiği görüldü. Biyodizel (B100) ve onun üçlü karışımlarında (TD30B10, TD30B20, TD30B10) 1743 cm^{-1} ’ de ester karbonil gruplarının esneme titreşimini gösteren güçlü pikler görüldü. Tüm numunelerin absorban bant aralıkları ve onlara atfedilen fonksiyonel gruplar (Al-Samaraae *et al.*, 2017) Tablo 13’ te gösterilmiştir.

Tablo 13. Biyodizel (B100), Euro Dizel (D100), Atık Trafo Yağı (T100) ve Karışımlarının Absorbans Bant Aralığı

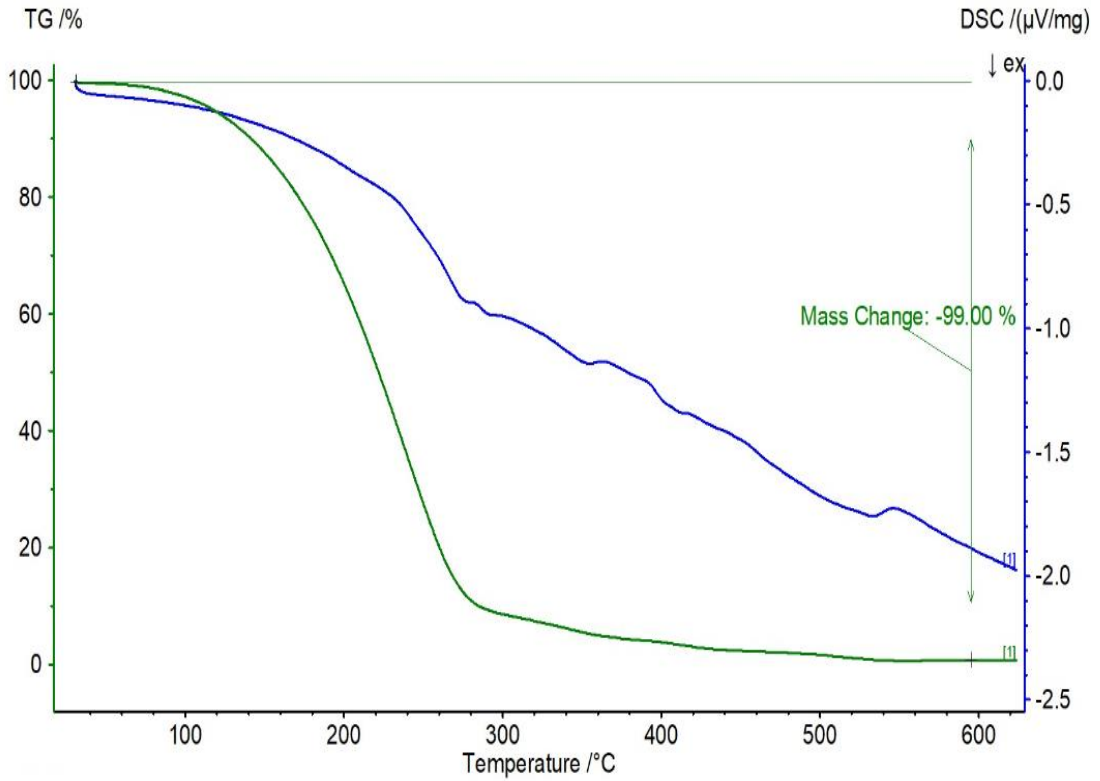
Absorpsiyon Bantları(cm^{-1})	Numune Çeşidi	Fonksiyonel Grup
3000-2900	B100	C-H Germe titreşimi (C-H stretching vibration)
	D100	
	T100	
	TD30	
	TD30B10	
	TD30B20	
	TD30B30	

Tablo 13. (devamı)

2900-2850	B100	CH ₂ asimetrik ve simetrik titreşim (CH ₂ asymmetric and symmetric vibration)
	D100	
	T100	
	TD30	
	TD30B10	
	TD30B20	
	TD30B30	
1750-1700	B100	C = O esneme titreşimi (Ester) (C = O Stretching vibration (Ester))
	TD30B10	
	TD30B20	
	TD30B30	
1500-1400	B100	CH ₂ Makaslama titreşimi (CH ₂ Scissoring vibration)
	D100	
	T100	
	TD30	
	TD30B10	
	TD30B20	
	TD30B30	
1200-1000	B100	C-O-C simetrik germe titreşimi (C-O-C symmetric stretching vibration)
	TD30B30	
900-700	B100	CH ₂ sallanma titreşimi (CH ₂ rocking vibration)
	TD30B20	
	TD30B30	

TG/DSC analizi

En iyi yanma performansı sergileyen TD30B10 numunesinin TG-DSC analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen TGA termogramı Şekil 21' de gösterilmiştir. Deneyler 10°C/dak ısıtma hızında ve 25-600°C aralığında hava ortamında yapılmıştır. Bu süre sonunda numunenin tamamen reaksiyona girdiği görülmektedir. Bu reaksiyon için DSC eğrisinde zayıf bir ekzotermik bir pik görülmektedir. TD30B10 numunesi için reaksiyon başlama sıcaklığı 55°C ve reaksiyon bitiş sıcaklığı ise 280°C civarındadır.



Şekil 21. TD30B10 Numunesinin TG (ağırlık kaybı %) ve DSC Eğrileri

Yakıt Karışımların Motor Performans Testleri

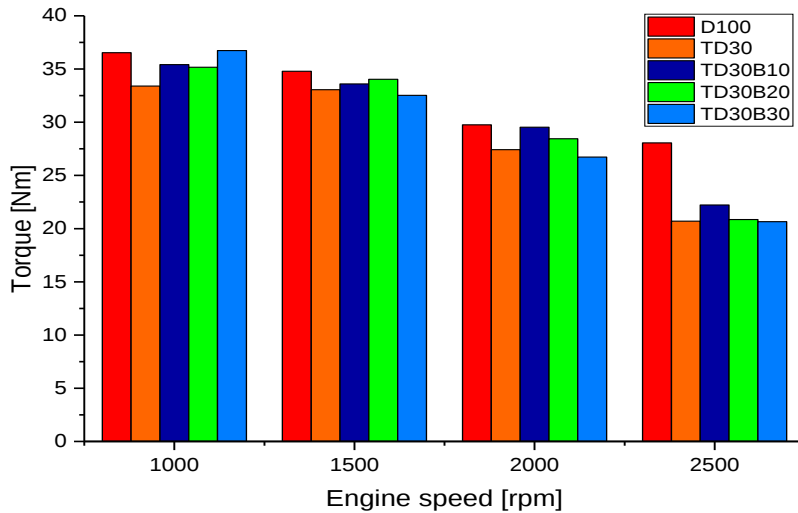
Hazırlanan 5 farklı yakıt karışımlarının motor performans deneyleri sıkıştırma ile ateşlemeli, direkt enjeksiyonlu, 4 zamanlı ve tek silindirli bir motorda gerçekleştirildi. Hazırlanan yakıt karışımlarının oranları ve miktarı Tablo 7’de gösterilmiştir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorun özellikleri ve şematik görüntüsü sırasıyla Tablo 9 ve Şekil 17’e gösterilmektedir. Yapılan bu motor deneyleri ile sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda hazırlanan 5 farklı yakıt karışımının (D100, TD30, TD30B10, TD30B20 ve TD30B30) motor performans özellikleri olan tork(T), fren gücü(BP) ve fren özgül yakıt tüketimi(BSFC) gibi özellikleri incelendi. Hazırlanan yakıt karışımlarının motor deneyleri gerçekleştirilirken ilk olarak sıkıştırma ile ateşlemeli deney motoru 3000 dev/dak’a da Euro dizel (D100) ile motor kararlı hale gelene kadar belirli bir süre (motor soğutma suyu sıcaklığı 90°C olana kadar) çalıştırıldı. İlk olarak ilk yakıt numunesi olan Euro dizel (D100) ile 2500 dev/dak için bütün motor performans ve emisyon değerleri için ikişer ölçüm yapıp değerlerin ortalamaları alındı. Bu işlemler daha sonrasında sırasıyla Euro dizel (D100) yakıt numunesi için 2000 dev/dak, 1500 dev/dak ve 1000 dev/dak için ölçümler ‘dealındı. Euro dizel (D100) yakıt numunesi için ölçümler yapıldıktan sonra Tablo 7’de gösterilen diğer yakıt numuneleri (TD30, TD30B10, TD30B20 ve TD30B30) için aynı ölçümler yapılırken her bir yakıt numunesinin motor deneyi yapılmadan önce Euro dizel (D100) ile motor çalıştırılarak her bir önceki yakıtın motor yakıt

aksanlarından temizlenmesi sağlandı. Bu şekilde daha düşük bir hata oranıyla ölçümlerin alınması sağlandı.

Sıkıştırma ile ateşlemeli deney motorunda yapılan motor deneylerinde yükleme ve tork ölçümünün gerçekleştirilmesi için su freni dinamometresi kullanıldı. Deney motorunun miline bağlı olan rotoru çevreleyen strator yatağı üstüne sabitlenerek stratora dinamometre sayesinde bağlanmıştır. Motor çalıştırıldıktan ve ısıldıktan sonra gaz kolu sabitlenerek gaz değişimi önüne geçilmesi sağlandı ve su freni yardımıyla motor yüklendi. Motorun bu yük altındaki devir sayısı en düşük devir sayısıdır. Daha sonrasında motora su freni dinamometresi sayesinde yük azaltılarak 3000 dev/dak'ya yükseltilecek belirli bir süre çalıştırıldıktan sonra motor yükü yavaş yavaş artırılarak sırasıyla 2500dev/dak, 2000 dev/dak, 1500 dev/dak ve 1000 dev/dak için her bir devir sayısında belirli bir süre beklendikten sonra her bir motor performans ve emisyon parametreleri için ikişer ölçüm yapılarak ortalamaları alındı. Yapılan bu deneyde su freni sayesinde motorun yüklenebilmesini ve motor performans parametrelerinin ölçülmesini sağlandı. Şekil 14'te gösterilen elektronik kontrol sistemi kullanılmıştır. Daha sonrasında ölçülen değerler grafik haline getirilerek hesaplanan her bir motor performans parametresi için ayrı ayrı yorumlanmıştır.

Tork (T)

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda yapılan 5 farklı yakıt karışımının 4 farklı devir sayısındaki üretilen Tork değerleri Şekil 22'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 22. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre tork (T) değişimleri

Şekil 22'deki grafik incelendiğinde Euro dizel (D100) yakıtının diğer yakıt karışımlarına göre 1000 dev/dak'daki TD30B30 yakıt karışımı hariç diğer tüm motor

devirlerindeki yapılan deneylerde Tork değeri diğer yakıt karışımlarına göre en yüksek değerleri almıştır. Tüm yakıt karışımları için motor devri arttıkça tork değeri azalmaktadır.

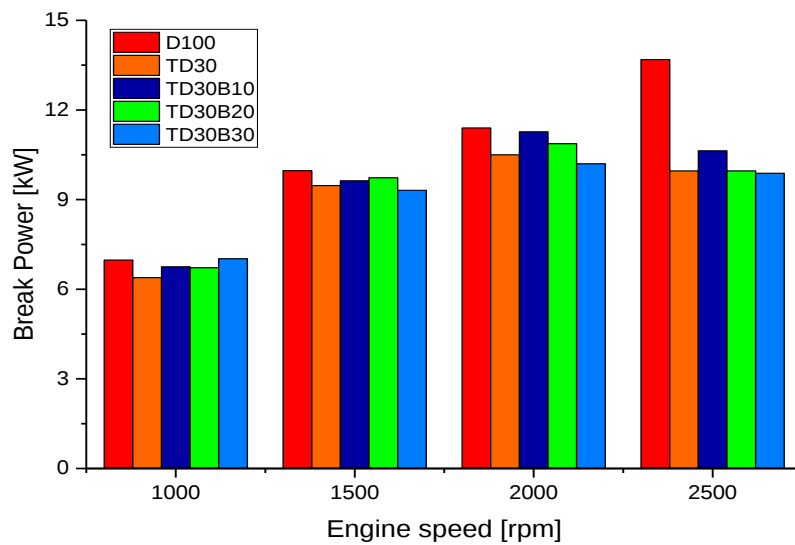
Tüm yakıt karışımlarının en yüksek tork değerleri motor devrinin düşük olduğu 1000 dev/dak motor hızında gerçekleşmiştir. Sonuçlar ise; D100 yakıtı için 36,53 Nm, TD30 yakıt karışımı için 33,40 Nm, TD30B10 için 35,41 Nm, TD30B20 yakıt karışımı için 35,17 Nm, TD30B30 yakıt karışımı için 36,74 Nm olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda tork değerlerinin oldukça yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.

Yakıt karışımlarına bakıldığında TD30 yakıt karışımına biyodizel yakıtı katılarak oluşturulan TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının içerisine biyodizel katılmasıyla tork değerlerinin TD30 yakıtına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan motor deneyinde tüm motor devir hızlarında üretilen yakıt karışımlarının ortalama tork değeri Euro dizel (D100) yakıtının tüm devir hızlarındaki ortalama tork değeri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %11,27 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %6,48 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %8,23 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %9,67'lik bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Fren gücü (BP)

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda yapılan 5 farklı yakıt karışımının 4 farklı devir sayısındaki üretilen fren gücü, motorun faydalı gücü olarakta bilinmektedir. Fren gücü dinamometrenin ölçtüğü kuvvet sayesinde ölçülen değerler elektronik kontrol paneli sayesinde okunarak değerleri Şekil 23'teki grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 23. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre fren gücü (BP) değişimleri

Şekil 23'teki grafik incelendiğinde Euro dizel (D100) yakıtının diğer yakıt karışımlarına göre 1000 dev/dak'daki TD30B30 yakıt karışımı hariç diğer tüm motor devirlerindeki yapılan deneylerde fren gücü değeri diğer yakıt karışımlarına göre en yüksek değerleri almıştır. Tüm yakıt karışımları için devir sayısının artmasıyla fren gücü artmıştır.

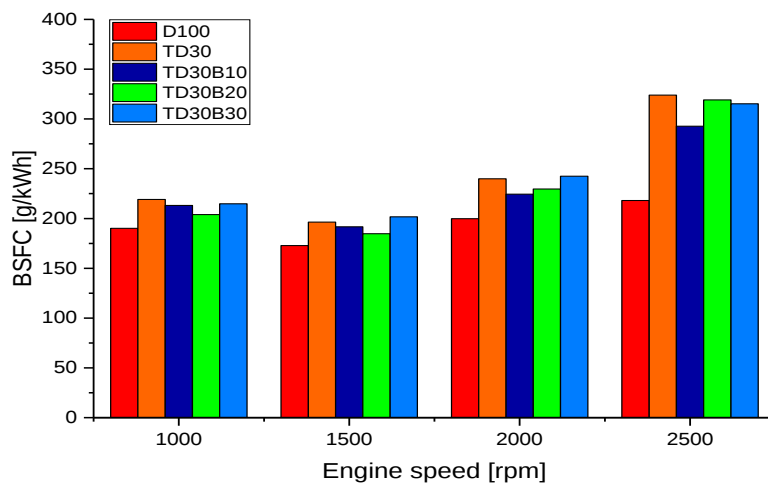
Yakıt karışımlarına bakıldığında TD30 yakıt karışımına biyodizel yakıtı katılarak oluşturulan TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının içerisine biyodizel katılmasıyla fren gücü değerlerinin TD30 yakıtına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan motor deneyinde tüm motor devir hızlarında üretilen yakıt karışımlarının ortalama fren gücü değeri Euro dizel (D100) yakıtının tüm devir hızlarındaki ortalama fren gücü değeri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %13,59 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %8,93 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %11,30 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %13,37'lik bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir .

Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)

Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC) birim güç başına yakıt tüketimini göstermektedir. Bunun sonucu olarak motorun aynı güç değerini üretebilmesi için tüm karışımlar için tüketilmesi gereken yakıt miktarları belirlenmiş olmaktadır.

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda yapılan 5 farklı yakıt karışımının 4 farklı devir sayısındaki üretilen Fren Özgül Yakıt Tüketimi (BSFC) değerleri Şekil 24'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 24. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre fren özgül yakıt tüketimi (BSFC)

Şekil 24'deki grafik incelendiğinde Euro dizel (D100) yakıtının diğer yakıt karışımlarına göre tüm motor devirlerindeki yapılan deneylerde özgül yakıt tüketimi değeri

diğer yakıt karışımlarına göre en düşük değerleri almıştır. Tüm yakıt karışımları için 1500 dev/dak motor devri hariç devir sayısının artmasıyla özgül yakıt tüketimi değerleri artmıştır.

Yakıt karışımlarına bakıldığında TD30 yakıt karışımına biyodizel yakıtı katılarak oluşturulan TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının içerisine biyodizel katılmasıyla özgül yakıt tüketimi değeri TD30 yakıtına göre tüm devir sayılarında genellikle daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

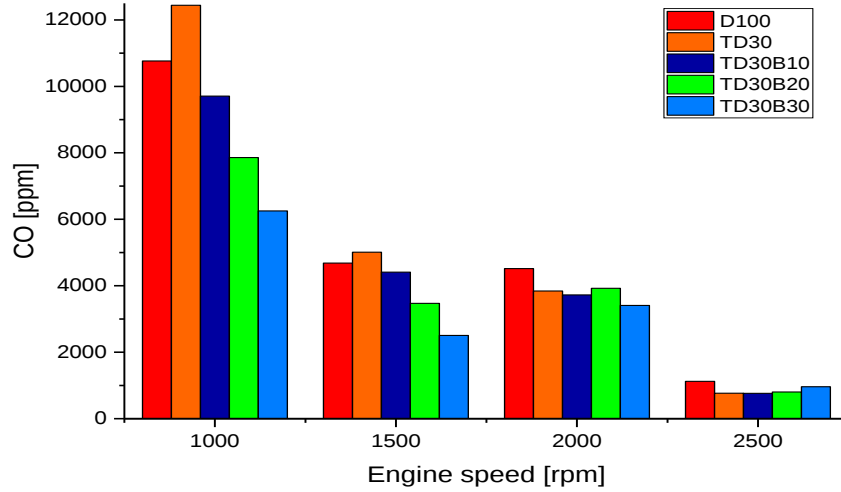
Yapılan motor deneyinde tüm motor devir hızlarında üretilen yakıt karışımlarının ortalama özgül yakıt tüketimi değeri Euro dizel (D100) yakıtının tüm devir hızlarındaki ortalama özgül yakıt tüketimi değeri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %25,4 artış, TD30B10 yakıt karışımında %18 artış, TD30B20 yakıt karışımında %20,1 artış ve TD30B30 yakıt karışımında ise %24,8'lik bir oranla artış gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Yakıt Karışımların Emisyon Testleri

Hazırlanan 5 farklı yakıt karışımı numunelerinin motor deneyinde emisyon ölçümlerinin alınması yakıt karışımlarının motor performans analizleri başlığı altında açıklandığı gibi her bir yakıt karışımının 4 farklı devir sayısında motor performans değerleri alınırken aynı zamanda Şekil 18'de gösterilen Testo 350 egzoz emisyon ölçüm cihazı ile ikişer defa ölçümler yapılarak test cihazına kaydedildi ve tüm yakıt numunelerinin motor performans ve emisyon ölçümü bittikten sonra cihaz ile komplike olan cihazın yazıcısından tüm yakıt numunelerinin egzoz emisyon ölçüm değerleri yazdırıldı. Daha sonrasında elde edilen ölçüm değerleri grafik haline getirilip bu başlık altında her bir emisyon için ayrı ayrı yorumlanmıştır.

CO emisyonu

Karbon monoksit kokusuz, renksiz ve solunması durumunda kandaki hemoglobine yapışarak oksijenin taşınmasına engel olmaktadır. Bunun sonucu olarak kalp ve beyinde ağır fonksiyon bozukluklarına yol açmaktadır. Yanma ürünleri içerisinde CO molekülünü içermesin önemli sebebi ise yanma odası içerisinde oksijenin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır (Tekbaş, 2005). Şekil 25'de 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak motor devir sayılarındaki tüm yakıt karışımları için CO emisyonlarının değişimleri gösterilmektedir.

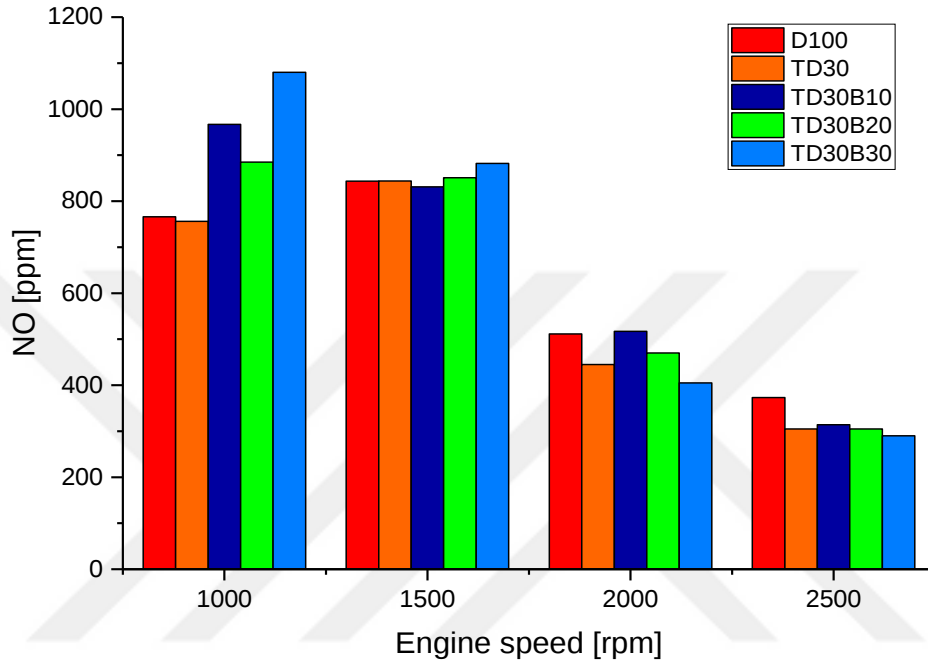


Şekil 25. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre CO emisyonlarının değişimleri

Şekil 25'deki grafik incelendiğinde, motor devir sayısı arttıkça CO emisyon değerinin hazırlan tüm yakıt karışımları için azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Euro dizel (D100) yakıtının CO emisyon değerleri ile tüm yakıt karışımları karşılaştırıldığında, TD30 yakıt karışımının CO emisyon değeri 1000 ve 1500 dev/dak motor devrinde yüksek iken diğer devirlerde ise daha düşük olduğu görülmüştür. 1000 dev/dak motor devirlerinde tüm yakıt karışımlarında CO emisyon değerlerinin yüksek olmasının nedeni yetersiz hava ile yüksek sıcaklıkta yanmanın gerçekleşmesiyle açıklanabilir (Ruhul *et al.*, 2017). Yüksek motor devirlerinde ise yük azaltılarak motor devir sayısı artırılmıştır ve hava hareketleri artmıştır. Bunun sonucunda yanma daha verimli bir şekilde gerçekleşmiştir ve CO emisyon değeri azalmıştır. Tüm yakıt karışımları için ayrı ayrı yapılan tüm motor devirlerinde ölçülen CO emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtı ile karşılaştırıldığında, TD30 yakıt karışımında %4,61 artış, TD30B10 yakıt karışımında %11,8 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %23,87 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %37,78'lik bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Karışımlardaki biyodizel oranının artması ve atık trafo yağı yüzdesinin azalmasıyla 1000 ve 1500 dev/dak motor devrinde CO emisyon seviyeleri kademeli olarak azalmıştır. 2000 ve 2500 dev/dak motor hızlarında ise CO emisyon seviyesi azalma oranları yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Yapılan inceleme sonucunda; TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının tüm motor devir hızlarına göre ölçülen ortalama CO emisyon değerleri Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devir hızlarına göre ölçülen ortalama CO emisyon değerlerine göre oldukça iyi sonuçlar verildiği görülmüştür.

NO emisyonu

Azot monoksit (NO) çevreye ve insan sağığına zarar vermektedir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma odasındaki sıcaklık 1800 K üzerine çıkması neticesinde oluşmaktadır. NO oluşumunu arttıran bir diğér parametre ise hava içerisindeki oksijen (O_2) konsantrasyonudur (Tekbaş, 2005).



Şekil 26. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre NO emisyonlarının değışimleri

Şekil 26'daki grafik incelendiğinde 1500 dev/dak motor devri hariç diğér tüm devir sayılarında devir sayısının artmasıyla NO emisyon değérlerinin düştüğü görülmüştür. Euro dizel (D100) yakıtı ile TD30 yakıt karışımı ile karşılaştırıldığında 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak motor devirlerinde TD30 yakıt karışımının NO emisyon değérleri daha düşüktür. Yakıt karışımında biyodizel oranının artmasıyla NO emisyonları değışimi Euro dizel (D100) yakıtının NO emisyon değeri ile karşılaştırıldığında 1000 ve 1500 dev/dak düşük motor devirlerinde artış sağlarken 2000 ve 2500 dev/dak yüksek motor devirlerinde ise kademeli bir şekilde azalma sağlanmıştır. Yani 1000 dev/dak motor devrindeki yakıt karışımlarının NO emisyon değérleri hariç diğér motor devirlerindeki yakıt karışımlarının NO emisyon seviyeleri Euro dizel (D100) yakıtının NO emisyon değérine göre azalma sağlanmıştır. Buda yapılan çalışmanın amacına ulaştığının göstergesidir.

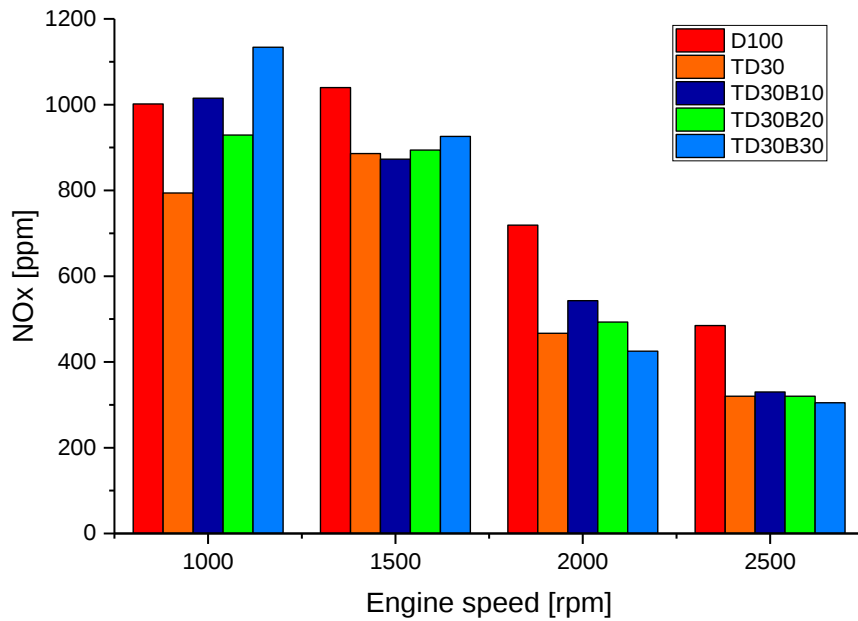
Yapılan motor deneyi testinde 1000 dev/dak motor devrinde TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının NO emisyon değérleri Euro dizel yakıtın NO emisyon değeri ile

karşılaştırıldığında sırasıyla % 26, %16 ve %41'lik bir oranda artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise düşük motor devir sayılarında fazla yük ve yetersiz hava ile kötü yanma olayının gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Tüm yakıt karışımları için ayrı ayrı yapılan tüm motor devirlerinde ölçülen NO emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devirlerinde ölçülen NO emisyonlarının ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %5,77 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %5,41 artış, TD30B20 yakıt karışımında %0,68 artış ve TD30B30 yakıt karışımında ise %6,54'lük bir oranla artış gerçekleştiği tespit edilmiştir.

NO_x emisyonu

Şekil 27'deki grafikte 1000, 1500, 2000 ve 2500 dev/dak motor devir sayılarındaki tüm yakıt karışımları için NO_x emisyonlarının değişimleri gösterilmektedir. Azot oksitlerin (NO_x) yanma sırasında açığa çıkmasının ana nedeni yüksek sıcaklıklarda yanmanın gerçekleşmesi sırasında yanma odasına alınan havanın içerisindeki aşırı yüksek oksijen içeriğidir. Yanma işlemi 1800 K'nin üzerinde bir sıcaklıkta gerçekleştiği zaman hava içerisindeki oksijen ve azot kimyasal olarak birleşerek NO_x molekülünü oluşturmaktadır (Haşımoğlu, 2000). Bu NO_x oluşum mekanizması Zeldovich mekanizmasıda denilmektedir (Ruhul *et al.*, 2017). Açığa çıkan NO_x emisyon miktarları dizel ve benzinli yakıt ile çalıştırılan motorlar karşılaştırıldığında açığa çıkan bir ton egzoz gazında sırasıyla 123.71 ve 18.42 kg NO_x açığa çıkmaktadır (İlkılıç *et al.* 2009).



Şekil 27. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak'ya göre NO_x emisyonlarının değişimleri

Şekil 27’deki grafikte hazırlanan yakıt karışımları ile yapılan sıkıştırma ile ateşlemeli motor deneyleri çalışmaları sonucunda açığa çıkan NO_x emisyon değerleri incelendiğinde hemen hem tüm devir sayılarında yakıt karışımların Euro dizel (D100) yakıt değeri ile karşılaştırıldıklarında yakıt karışımlarının NO_x emisyon değeri Euro dizele (D100) göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre yapılan çalışmanın emisyon seviyesini düşürdüğü yani çalışmanın amacına ulaştığının göstergesidir.

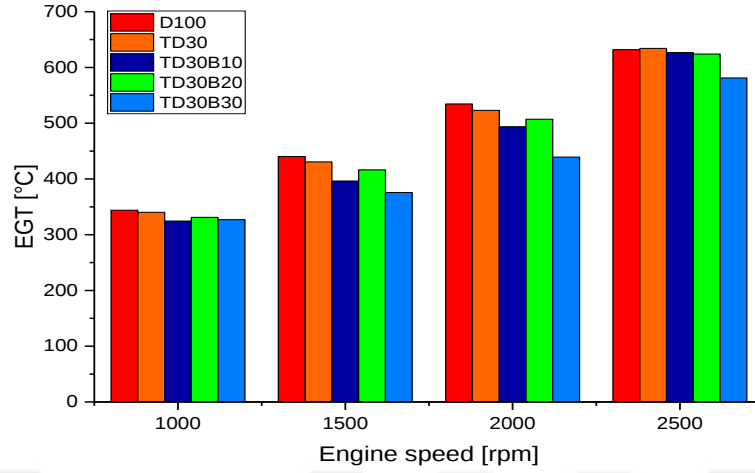
Yapılan motor deneyi testinde 1000 dev/dak motor devrinde TD30B10 ve TD30B30 yakıt karışımlarının NO_x emisyon değerleri Euro dizel yakıt NO_x emisyon değeri ile karşılaştırıldığında sırasıyla %1,3 ve %13’lük bir oranda artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise düşük motor devir sayılarında fazla yük ve yetersiz hava ile kötü yanma olayının gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. 1000 dev/dak motor devrinde en yüksek NO_x oluşumu TD30B30 yakıt karışımında, en düşük NO_x oluşumu ise TD30 yakıt karışımında gerçekleşmiştir. Diğer tüm motor devirlerinde en yüksek NO_x oluşumu Euro dizel (D100) yakıtında gerçekleşmiştir. Karışımlardaki biyodizel oranının artması ve atık trafo yağı yüzdesinin azalmasıyla 1000 ve 1500 dev/dak motor devrinde NO_x emisyon seviyeleri bir miktar artarken 2000 ve 2500 dev/dak motor hızlarında ise NO_x emisyon seviyesi kademeli olarak azalmıştır. 2000 ve 2500 dev/dak motor devrinde düşük yük koşulunda ve artan hava hareketleriyle sıcaklık düşmüştür. Bunun sonucunda ise NO_x emisyon seviyelerinde yüksek bir oranda azalma sağlamıştır.

Tüm yakıt karışımları için ayrı ayrı yapılan tüm motor devirlerinde ölçülen NO_x emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devirlerinde ölçülen NO_x emisyonlarının ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %23,98 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %14,92 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %18,78 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %14,03’lük bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yapılan yorumlama ve çalışmalar sonucunda TD30, TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının tüm motor devir hızlarına göre ölçülen ortalama NO_x emisyon değerleri Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devir hızlarına göre ölçülen ortalama NO_x emisyon değerine göre oldukça iyi sonuçlar verildiği görülmüştür.

Egzoz gaz sıcaklığı (EGT)

Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanmanın çok yüksek sıcaklıklarda oluşmasına bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıkları da artmaktadır. Yanma sonucunda açığa çıkan enerjinin egzozdan ısı enerjisi olarak atılması istenmemektedir. Bu durumun açıklaması ise egzoz gazının sıcaklığının yüksek olması durumunda sıkıştırma ile ateşlemeli motorun ısı verimlerinin düştüğü manasına gelmektedir (Arpa *et al.*, 2019). Hazırlanan 5 farklı yakıt numunelerinin

motor devir sayılarına göre açığa çıkan egzoz gazı sıcaklıkları değişimleri Şekil 28’de gösterilmiştir.



Şekil 28. Farklı yakıt karışımlarının 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak’ya göre egzoz gaz sıcaklığı (EGT) değişimleri

Şekil 28’deki egzoz gazı sıcaklıkları incelendiğinde bütün yakıt karışımları için motor devir sayısının artması sonucunda doğru orantılı olarak egzoz gazı sıcaklığında arttığı görülmektedir. Dizel yakıt ile diğer yakıt karışımları kıyaslandığında ise sadece 2500 dev/dak’daki TD30 yakıt karışımı hariç bütün farklı yakıt karışımları için egzoz gazı sıcaklıklarının düşük olması sıkıştırma ile ateşlemeli motorda yakılan yakıt karışımlarında yüksek olan egzoz gazı sıcaklıklarına göre daha yüksek bir iş açığa çıktığının göstergesidir.

Sıkıştırma ile ateşlemeli test motorunda motor performans ve egzoz sıcaklık değerleri direk olarak test motoru üzerinden ölçümleri yapılmıştır. Fakat egzoz sıcaklık ölçümü direk olarak egzoz çıkışından ölçümü gerçekleştirilmiş olsaydı test motorunun devir sayısının artması neticesinde egzoz gazı sıcaklıklarının artışı gaz akış hızlarının ve egzoz basıncının artması ile doğru orantılı olarak bu artışın gerçekleştiği sonucuna varılabilirdi.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sonuçlar

Bu tez çalışmasında atık zeytin çekirdeği ve zeytinyağından transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizel ve atık trafo yağı Euro dizel yakıt ile karıştırılarak 5 farklı yakıt numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan yakıt karışımları 4 farklı devir sayısında (2500, 2000, 1500 ve 1000 dev/dak) tek silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli direkt enjeksiyonlu bir motorda motor performans ve egzoz emisyon testleri gerçekleştirildi. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde kısaca özetlenmiştir;

1. Biyodizel ile Atık trafo yağı dizele yakın karakteristik özelliklere sahiptir. Yüksek viskozite ve özgül ağırlık değerleri bakımından dezavantaj, yüksek kalorifik değere sahip olması açısından avantaj sağlamıştır.
2. Tüm Euro dizel yakıt, atık trafo yağı ve biyodizel karışımları sıkıştırma ile ateşlemeli dizel motorlarda herhangi bir modifikasyona gerek olmaksızın kullanılabilir.
3. Tüm devir sayılarında her yakıt karışımının ürettiği ortalama tork değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD30 yakıtında görülmüştür. Yakıt karışımları içerisinde en iyi ortalama Tork değerine D100' e göre %6,48 düşüşle TD30B10 sahiptir.
4. Tüm devir sayılarında her yakıtın ürettiği ortalama BP değeri en yüksek D100 yakıtında, en düşük ise TD30 yakıtında görülmüştür. Yakıt karışımları içerisinde en iyi ortalama BP değerine TD30B10 sahiptir. TD30B10 yakıtı max. BP değerine 2000 dev/dak hızda ulaşmıştır.
5. Euro dizel (D100) yakıtının diğer yakıt karışımlarına göre tüm motor devirlerindeki yapılan deneylerde özgül yakıt tüketimi değeri diğer yakıt karışımlarına göre en düşük değerleri almıştır. Tüm yakıt karışımları için 1500 dev/dak motor devri hariç devir sayısının artmasıyla özgül yakıt tüketimi değerleri artmıştır.
6. Yakıt karışımlarına bakıldığında TD30 yakıt karışımına biyodizel yakıtı katılarak oluşturulan TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının içerisine biyodizel katılmasıyla özgül yakıt tüketimi değeri TD30 yakıtına göre tüm devir sayılarında genellikle daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

7. Yapılan motor deneyinde tüm motor devir hızlarında üretilen yakıt karışımlarının ortalama özgül yakıt tüketimi değeri Euro dizel (D100) yakıtının tüm devir hızlarındaki ortalama özgül yakıt tüketimi değeri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %25,4 artış, TD30B10 yakıt karışımında %18 artış, TD30B20 yakıt karışımında %20,1 artış ve TD30B30 yakıt karışımında ise %24,8'lik bir oranla artış gerçekleştiği tespit edilmiştir . Bu değerler incelendiğinde en iyi sonucu veren yakıt karışımı TD30B10'dur.
8. Genellikle motor devir sayısı arttıkça CO emisyon değerinin hazırlan tüm yakıt karışımları için genellikle azaldığı görülmektedir. Yakıt karışımları Euro dizel (D100) yakıtının CO emisyon değerleri ile karşılaştırıldığında, TD30 yakıt karışımının CO emisyon değeri 1000 ve 1500 dev/dak motor devrinde yüksek bir değerde iken diğer devirlerde ise emisyon değeri düşük çıkmıştır. 1000 dev/dak motor devirlerinde tüm yakıt karışımlarında CO emisyon değerlerinin yüksek olmasının nedeni ise yetersiz hava ile yüksek sıcaklıkta yanmanın gerçekleşmesiyle düşük motor devrinde CO emisyon miktarını arttırmıştır.
9. Yapılan motor deneyi testinde 1000 dev/dak motor devrinde TD30B10, TD30B20 ve TD30B30 yakıt karışımlarının NO emisyon değerleri Euro dizel yakıtın NO emisyon değeri ile karşılaştırıldığında sırasıyla % 26, %16 ve %41'lik bir oranda artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise düşük motor devir sayılarında fazla yük ve yetersiz hava ile kötü yanma olayının gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.
10. Tüm yakıt karışımları için ayrı ayrı yapılan tüm motor devirlerinde ölçülen NO emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devirlerinde ölçülen NO emisyonlarının ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %5,77 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %5,41 artış, TD30B20 yakıt karışımında %0,68 artış ve TD30B30 yakıt karışımında ise %6,54'lük bir oranla artış gerçekleştiği tespit edilmiştir.
11. Yapılan motor deneyi testinde 1000 dev/dak motor devrinde TD30B10 ve TD30B30 yakıt karışımlarının NO_x emisyon değerleri Euro dizel yakıt NO_x emisyon değeri ile karşılaştırıldığında sırasıyla %1,3 ve %13'lük bir oranda artış gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise düşük motor devir sayılarında fazla yük ve yetersiz hava ile kötü yanma olayının gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. 1000 dev/dak motor devrinde en yüksek NO_x oluşumu TD30B30 yakıt karışımında, en düşük NO_x oluşumu ise TD30 yakıt karışımında gerçekleşmiştir. Diğer tüm motor devirlerinde en yüksek NO_x oluşumu Euro dizel (D100) yakıtında gerçekleşmiştir.

12. Tüm yakıt karışımları için ayrı ayrı yapılan tüm motor devirlerinde ölçülen NO_x emisyonlarının ortalama değerlerinin Euro dizel (D100) yakıtının tüm motor devirlerinde ölçülen NO_x emisyonlarının ortalama değerleri ile karşılaştırıldığında TD30 yakıt karışımında %23,98 düşüş, TD30B10 yakıt karışımında %14,92 düşüş, TD30B20 yakıt karışımında %18,78 düşüş ve TD30B30 yakıt karışımında ise %14,03'lük bir oranla düşüş gerçekleştiği tespit edilmiştir.
13. Bütün yakıt karışımları için motor devir sayısının artması sonucunda doğru orantılı olarak egzoz gazı sıcaklığında arttığı görülmektedir. Dizel yakıt ile diğer yakıt karışımları kıyaslandığında ise sadece 2500 dev/dak'daki TD30 yakıt karışımı hariç bütün farklı yakıt karışımları için egzoz gazı sıcaklıklarının düşük olması sıkıştırma ile ateşlemeli motorda yakılan yakıt karışımlarında yüksek olan egzoz gazı sıcaklıklarına göre daha yüksek bir iş açığa çıktığının göstergesidir.
14. TG-DSC analizi sonucunda en iyi yanma performansını sergileyen yakıt karışımı TD30B10 yakıt karışımı numunesidir.

Öneriler

İleride yapılacak olan bu tür motor deneyi çalışmaları için atık trafo yağının farklı alkollerle karışımlarının hazırlanarak, motor performans ve emisyon değerlerinin araştırılmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelrahman, M. H., Hussain, R. O., Shaheed, D. S., Abukhader, M., & Khan, S. A. (2019). Gas chromatography-mass spectrometry analysis and in vitro biological studies on fixed oil isolated from the waste pits of two varieties of *Olea europaea* L. *OCL - Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 26(4), 1–8. <https://doi.org/10.1051/ocl/2019022>
- Ajay, J., & Viswanath, G. (2020). A study on waste transformer oil blended with BD IC engine application. *Materials Today: Proceedings*, 22(xxxx), 865–868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.034>
- Al-Samaraae, R., Atabani (A.E. Atabani), A., Uğuz, G., Kumar, G., Arpa, O., Ayanoglu, A., Mohammed, M., & Farouk Abdelraheem Elhaj, H. (2017). Perspective of safflower (*Carthamus tinctorius*) as a potential biodiesel feedstock in Turkey: characterization, engine performance and emissions analyses of butanol–biodiesel–diesel blends. *Biofuels*, 11, 1–17. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1398956>
- Alptekin, E. (2005). Biyodizel ve Türkiye’deki Durumu. *Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, 57–64.
- Altun Ş., G. M. A. (2005). Bitkisel Yağların Alternatif Yakıt Olarak Dizel Motorlarında Kullanılması. *HR.Ü.Z.F.Dergisi*, 9(3), 35–42.
- Anonim. (2012). *Türkiye’de Atık Yönetimi Sempozyumu* (p. 18). T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Arpa, O., Demir, M., & Yumrutaş, R. (2019). Atık Yağlama Yağından Elde Edilen Yakıt-Motorin Karışımlarının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarının Araştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 191–201. <https://doi.org/10.24012/dumf.523585>
- Atabani, A. E., & AL Kulthoom, S. (2020). Spectral, thermoanalytical characterizations, properties, engine and emission performance of complementary biodiesel-diesel-pentanol/octanol blends. *Fuel*, 282(May), 118849. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118849>
- Atabani, A. E., Mekaoussi, M., Uguz, G., Arpa, O., Ayanoglu, A., & 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 and Environment*, 31(5), 755–784. <https://doi.org/10.1177/0958305X18790953>
- Ayadi, M., Saragih, F. N. A., Awad, S., Priadi, C., Abderrabba, M., Tazerout, M., & Andres, Y. (2021). Two steps methanolysis and ethanolysis of olive pomace oil using olive-pomace-based heterogeneous acid catalyst. *Fuel*, 296(March), 120678. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120678>
- Balat, M., & Balat, H. (2010). Progress in biodiesel processing. *Applied Energy*, 87(6), 1815–1835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.012>
- Barnwal, B. K., & Sharma, M. P. (2005). Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(4), 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.007>
- Basha, S. A., Gopal, K. R., & Jebaraj, S. (2009). A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7),

- Bedir, Ö., & Doğan, T. H. (2021). Comparison of catalytic activities of Ca-based catalysts from waste in biodiesel production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1883159>
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Belkhode, P. N., Ganvir, V. N., Shende, A. C., & Shelare, S. D. (2021). Utilization of waste transformer oil as a fuel in diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 49(xxxx), 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.008>
- Bukkarapu, K. R., & Krishnasamy, A. (2021). A study on the effects of compositional variations of biodiesel fuel on its physiochemical properties. *Biofuels*, 12(5), 523–535. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1501638>
- Cihan, Ö. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of fig seed oil methyl ester biodiesel blends on combustion characteristics and performance in a diesel engine. *Energy Reports*, 7, 5846–5856. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.180>
- Dağ C. (2013). Biyodizel Su Karışımlarının Dizel Motor Performans Ve Emisyonu Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, 6–32.
- Dehghan, L., Golmakani, M. T., & Hosseini, S. M. H. (2019). Optimization of microwave-assisted accelerated transesterification of inedible olive oil for biodiesel production. *Renewable Energy*, 138, 915–922. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.017>
- Dharma, S., Silitonga, A. S., Shamsuddin, A. H., Sebayang, A. H., Milano, J., Sebayang, R., Sarjianto, Ibrahim, H., Bahri, N., Ginting, B., & Damanik, N. (2019). Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–13. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1668883>
- El-Kassaby, M., & Nemit-Allah, M. A. (2013). Studying the effect of compression ratio on an engine fueled with waste oil produced biodiesel/diesel fuel. *Alexandria Engineering Journal*, 52(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.11.007>
- Eryılmaz, T. (2014). Yozgat İli Şartlarında Yetiştirilen Aspir (*Carthamus tinctorius* L.) Dinçer Çeşidinden Üretilen Biyodizelin Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, 31(2014–1), 63–63. <https://doi.org/10.13002/jafag703>
- Fukuda, H., Kondo, A., & Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405–416. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(01\)80288-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(01)80288-7)
- Gonzalez Gomez, M. E., Howard-Hildige, R., Leahy, J. J., O'Reilly, T., Supple, B., & Malone, M. (2000). Emission and performance characteristics of a 2 litre Toyota diesel van operating on esterified waste cooking oil and mineral diesel fuel. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65(1–2), 13–20. <https://doi.org/10.1023/A:1006446326210>
- Haşimoğlu, C. (2000). *Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi*.
- Horuz, A., Korkmaz, A., & Akınoğlu, G. (2015). Biyoyakıt Bitkileri ve Teknolojisi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 3(2), 69–81.

- İlkılıç, C. (1999). *Çeşitli Alternatif Yakıtların Dizel Motoru Emisyonlarına Etkilerinin Teorik Ve DeneySEL İncelenmesi* (pp. 7–10).
- İlkılıç, C., Behçet, R., & Aydın, S. (2009). *Dizel Motorlarında Azot Oksitlerin Oluşumu Ve Kontrol Yöntemleri*. X, 13–15.
- Karimi, P., Najafi, B., Ardabili, S. F., Mesri-Gundoshmian, T., Ariyanfar, L., & Haghighatshoar, F. (2020). Ethyl ester production from Iranian bitter almond (BAO) oil to improve the performance and emissions of OM457 diesel engine. *Renewable Energy Focus*, 33(June), 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2020.02.001>
- Kelen, F. (2014). Heart of my heart; mother and child,. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1–2), 80–87.
- Knothe, G., Dunn, R. O., & Bagby, M. O. (1997). Biodiesel: The Use of Vegetable Oils and Their Derivatives as Alternative Diesel Fuels. *ACS Symposium Series*, 666, 172–208. <https://doi.org/10.1021/bk-1997-0666.ch010>
- Koç, M. (2011). Biyodizel Üretimine Uygun Türkiye’de Yetişen ve Yetiştirilecek Bitkilerin Belirlenmesi. *Doktora Tezi*.
- MEB. (2011). YG Tesislerinde Trafo Sistemleri Bakımı. *Elektrik Elektronik Teknolojisi Dergisi*, 114.
- Mohta, V., & Basavaraj, M. (2015). Preparation of Alternative Fuel from Waste Transformer Oil and Studying Performance Characteristics On Diesel Engine for Different Blends. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(10), 2013–2016.
- Nabi, M. N., Akhter, M. S., & Rahman, M. A. (2013). Waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine. *Procedia Engineering*, 56, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.139>
- Ölçüm, T. (2006). Biyodizel Teknolojisi. *YıldızTekni Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- Ondruschat, B. (2020). Biodiesel Production Technology. *Catalysis from A to Z*, July. <https://doi.org/10.1002/9783527809080.cataz01943>
- Öner, İ. V., Atabani, A. E., & Durnagöl, T. (2023). 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. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56(April 2022). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103023>
- Oseh, J. O., Mohd Norddin, M. N. A., Ismail, I., Ismail, A. R., Gbadamosi, A. O., Agi, A., & Ogiriki, S. O. (2019). Investigating almond seed oil as potential biodiesel-based drilling mud. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 181(March), 106201. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106201>
- Öztürk, E. (2015). Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil-hazelnut soapstock biodiesel mixture. *Fuel Processing Technology*, 129, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.016>
- Öztürk, E., Can, Ö., Usta, N., & Yücesu, H. S. (2020). Effects of retarded fuel injection timing on combustion and emissions of a diesel engine fueled with canola biodiesel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(6), 1466–1475. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.06.008>
- Plasquy, E., García Martos, J. M., Florido Fernández, M. D. C., Sola-Guirado, R. R., & García Martín, J. F. (2021). Cold storage and temperature management of olive fruit: The impact on fruit physiology and olive oil quality—a review. *Processes*, 9(9).

<https://doi.org/10.3390/pr9091543>

- Prasad, R., & Bella, V. R. (2010). A review on diesel soot emission, its effect and control. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 5(2), 69–86. <https://doi.org/10.9767/bcrec.5.2.794.69-86>
- Prasanna Raj Yadav, S., Saravanan, C. G., Vallinayagam, R., Vedharaj, S., & Roberts, W. L. (2015). Fuel and engine characterization study of catalytically cracked waste transformer oil. *Energy Conversion and Management*, 96, 490–498. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.051>
- Ruhul, A. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Shahir, S. A., Alabdulkarem, A., Teoh, Y. H., How, H. G., & Reham, S. S. (2017). Evaluating combustion, performance and emission characteristics of *Milletia pinnata* and *Croton megalocarpus* biodiesel blends in a diesel engine. *Energy*, 141, 2362–2376. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.096>
- Sabancı, A., Atal, M., & Yaşar, A. (2006). Türkiye’de Biyodizel Kullanım ve Olanakları. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 2(1), 33–39.
- Safgönül, B. (1995). *İçten Yanmalı Motorlar* (pp. 50–57). Birsen Yayınevi.
- Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E., Turkcan, A., & Ozsezen, A. N. (2015). Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a di diesel engine. *Fuel*, 159, 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.081>
- Sethuraman, N., Karthikeyan, D., Vinodraj, S., Thamizhvel, R., & Kumarasamy, G. (2022). Performance and emission characteristics on CI engine by using waste cooking oil and waste transformer oil as substitute fuel with coconut shell as a catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2469–2475. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.457>
- Simsek, S. (2020). Effects of biodiesel obtained from Canola, sefflower oils and waste oils on the engine performance and exhaust emissions. *Fuel*, 265(December 2019), 117026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117026>
- Simsek, S., & Uslu, S. (2020). Comparative evaluation of the influence of waste vegetable oil and waste animal oil-based biodiesel on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 280(July), 118613. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118613>
- Singh, R., & Kumar, R. (2022). Insights into the influence of n-butanol with neat biodiesel and biodiesel-diesel blends on diesel engine characteristics: Review. *International Journal of Energy Research*, 46(5), 5441–5466. <https://doi.org/10.1002/er.7550>
- Singh, S. P., & Singh, D. (2010). Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.017>
- Tekbaş, Ö. F. (2005). *Küresel Isınma, İklim Değişikliği ve Sağlık Etkileri*.
- Teresa L. Alleman, R. L. M. (2016). Biodiesel handling and use guide. In *Biodiesel Handling and Use Guide (Fifth Edition)* (Issue November).
- Ulusoy, Y., & Alibaş, K. (2002). Diesel Motorlarda Biodiesel Kullanımının Teknik ve Ekonomik Olarak İncelenmesi. *Ulud. Üniv. Zir. Fak. Derg.*, 16, 37–50.
- Utlü, Z., & Koçak, M. S. (2008). The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renewable Energy*, 33(8), 1936–1941. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.006>
- Uzun, G. (2018). Yağ Asidi Katkılı Kolza Yağından Biyodizel Üretimi ve Üretilen

Biyodizellerin Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi. *Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.*

- Yadav, S. P. R., Saravanan, C. G., & Kannan, M. (2015). Influence of injection timing on di diesel engine characteristics fueled with waste transformer oil. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 881–888. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.07.008>
- Yaşar, F. (2019). Evaluation of Renewable Energy Source Algae As Biodiesel Feedstock. *European Journal of Technic*, 9(2), 298–311. <https://doi.org/10.36222/ejt.631910>
- Zlenc, Ş. G. İ. İ., Acar, M., & N, M. Ş. A. H. İ. (2012). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (Biyodizel, Biyoetanol ve Biyokütle) Projeksiyonu. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(3), 337–344.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammet Büyükoğlu
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	T.C.
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
TMMOB Makine Mühendisleri Odası	