

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**HİNDİ KESİMHANESİ RENDERİNG YAĞINDAN BİYODİZEL
ÜRETİMİ VE DİZEL MOTORU PERFORMANS, EMİSYON VE
YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞENOL TÜRK

BOLU, MART - 2018

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**HİNDİ KESİMHANESİ RENDERİNG YAĞINDAN BİYODİZEL
ÜRETİMİ VE DİZEL MOTORU PERFORMANS, EMİSYON VE
YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞENOL TÜRK

BOLU,MART - 2018

KABUL VE ONAY SAYFASI

Şenol TÜRK tarafından hazırlanan “**HİNDİ KESİMHANESİ RENDERİNG YAĞINDAN BİYODİZEL ÜRETİMİ VE DİZEL MOTORU PERFORMANS, EMİSYON VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması 26.03.2018 tarihinde **ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Dr. Öğr. Ü. Alaattin Osman EMİROĞLU

Üye
Prof. Dr. Ali Naci ÇELİK

Üye
Doç. Dr. Suat SARIDEMİR

İmza



Doç. Dr. Ömer ÖZYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

1. Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 2. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 3. Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 4. Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 5. Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Şenol TÜRK

ÖZET

HİNDİ KESİMhanESİ RENDERİNG YAĞINDAN BİYODİZEL ÜRETİMİ VE DİZEL MOTORU PERFORMANS, EMİSYON VE YANMA KARAKTERİSTİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ŞENOL TÜRK

ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU)

BOLU, MART - 2018

Yakın gelecekte petrol rezervlerinin tükeneyeceği çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Bu sebeple, dünya genelinde alternatif enerji kaynakların araştırılmasına olan ilgi artmıştır. Biyodizel, tükenme sorunu olmayan yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağıdır ve modern dizel motorlarında herhangi bir değişiklik yapmadan sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Biyodizel üretiminde pek çok farklı hammaddeler kullanılabilir olmasına rağmen, ucuz olmasından dolayı, atık hayvansal yağlardan biyodizel üretimi oldukça cazip görünmektedir. Bu çalışmada Bolu'daki hindi kesimhanesinden alınan hindi rendering yağından üretilen biyodizel, petrol kökenli dizel yakıtı ile farklı oranlarda karıştırıldıktan sonra, motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri tek silindirli, direk püskürtmeli bir dizel motorunda test edilmiştir. Deneyler sonucunda; tüm motor devirlerinde, biyodizel karışımlarının tutuşma gecikmeleri daha uzun olduğu için maksimum silindir basıncı ve maksimum ısı salınımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Biyodizel ilavesi moment ve ısı veriminde bir miktar azalmaya, fakat özgül yakıt tüketiminde ise bir miktar artışa neden olmuştur. B10 ve B20 karışımları referans dizel yakıtla kıyasla, NO_x emisyonlarında azalmaya neden olurken, B50 ise hafif bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, tüm biyodizel karışımları, CO ve is emisyonlarında azalmaya neden olmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Alternatif yakıt, Biyodizel, Hindi rendering yağı, Yanma, Egzoz Emisyonları, Dizel Motoru

ABSTRACT

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM TURKEY SLAUGHTERHOUSE RENDERING FAT AND INVESTIGATION OF THE EFFECT ON PERFORMANCE, EMISSION AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE

**MSC THESIS
ŞENOL TÜRK**

**ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU)**

BOLU, MARCH 2018

It is expressed by various researchers that oil reserves will be consumed in near future. For this reason, there is increased interest in exploring alternative energy sources around the world. Biodiesel is a renewable and clean energy source that does not have an exhaustion problem and can be used without problems in modern diesel engines without any modification. Despite the fact that many different raw materials can be used in the production of biodiesel, biodiesel production from waste animal fats seems attractive because of its low cost. In this study, biodiesel produced from turkey rendering fat from turkey slaughterhouse in Bolu was mixed with petroleum diesel fuel at different ratios and then the engine performance, exhaust emissions, and combustion characteristics were tested in a single cylinder, direct injection diesel engine. As a result of experiments; at all engine revolutions, the maximum cylinder pressures and maximum heat releases were found to be higher because the ignition delays of the biodiesel blends were longer. The addition of biodiesel resulted in a slight decrease in torque and thermal efficiency, but a slight increase in specific fuel consumption. B10 and B20 blends caused a reduction in NO_x emissions compared to the reference diesel fuel, while B50 caused a slight increase. In addition, all biodiesel blends have caused a decrease in CO and smoke emissions.

KEYWORDS: Alternative Fuel, Biodiesel, Turkey rendering fat, Combustion, Exhaust Emissions Diesel Engine

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xi
TEŞEKKÜR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. BİYODİZEL VE ÜRETİMİ.....	12
3.1 Biyodizel	12
3.1.1 Bitkisel ve Hayvansal Yağların Kimyasal Yapısı.....	12
3.1.2 Bitkisel ve Hayvansal Yağlardan Biyodizel Üretimi.....	14
3.1.2.1 Transesterifikasyon	14
3.1.2.2 Proliz	16
3.1.2.3 Emülsiyon Oluşturma.....	16
3.1.3 Biodizel ve Motorin Yakıt Standartları	18
3.1.4 Türkyede'deki Atık Bitkisel ve Hayvansal Yağ Potansiyeli.....	20
3.1.5 Türkiye'de Biyodizel.....	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM	23
4.1 Biyodizel Üretimi ve Karakterizasyonu	23
4.1.1 Biyodizel Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Kimyasallar	23
4.1.1.1 Hassas Terazî	23
4.1.1.2 Manyetik Karıştırıcılı, Sıcaklık Kontrollü Isıtıcı.....	24
4.1.1.3 Cam Malzemeler.....	24
4.1.1.4 Kimyasal Malzemeler	24
4.1.2 Biyodizel Üretiminde Hammadde Olarak Kullanılan Hindi Rendering Yağı ve Özellikleri.....	25
4.1.3 Biyodizel Üretim Yöntemi	26
4.1.3.1 Ön İyileştirme	26
4.1.3.2 Transesterifikasyon.....	28
4.1.4 Üretilen BiyodizelinYakıt Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
4.2 Motor Performans, Ekzoz Emisyon ve Yanma Karakterizasyon Testleri.....	36
4.2.1 Yakıt Karışımlarının Hazırlanması	36
4.2.2 Motor Testleri	36
4.2.2.1 Test Motoru	38

4.2.2.2	Dinamometre	39
4.2.2.3	Tork Ölçüm Ünitesi	39
4.2.2.4	Ekzoz Emisyon Analiz Cihazı ve İş Ölçer.....	40
4.2.2.5	Silindir Basınç Sensörü.....	40
4.2.2.6	Yakıt Hat Basınç Sensörü.....	41
4.2.2.7	Enkoder	42
4.2.2.8	Veri Toplama Sistemi (Kistler KiBox).....	43
4.2.2.9	Bilgisayar	43
4.2.3	Elde Edilen ve Hesaplanan Performans Parametreleri	43
4.2.3.1	Motor Momentinin Hesaplanması	43
4.2.3.2	Efektif Gücün Hesaplanması	44
4.2.3.3	Isıl Verimin Hesaplanması	45
4.2.3.4	Özgül Yakıt Tüketiminin Hesaplanması	45
4.2.3.5	Isı Salınım Oranının Hesaplanması	46
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1	Biyodizel Yakıt Analiz Sonuçları	49
5.2.	Motor Test Sonuçları	50
5.2.1	Yanma Karakteristikleri	50
5.2.1.1	Enjeksiyon Başlangıcı ve Tutuşma Gecikmesi.....	50
5.2.2.2	Silindir Gaz Basıncı	53
5.2.2.3	Isı Salınım Oranı.....	55
5.2.3	Motor Performansı.....	58
5.2.3.1	Moment.....	58
5.2.3.2	Özgül Yakıt Tüketimi	58
5.2.3.3	Isıl Verim	59
5.2.4	Egzoz Emisyonları.....	60
5.2.4.1	CO Emisyonları	60
5.2.4.2	NO _x Emisyonları.....	61
5.2.4.3	İş Emisyonları.....	62
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	64
7.	KAYNAKLAR.....	66
8.	ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Trigliserit	13
Şekil 3.2. Yağ asidinin kimyasal yapısı.....	13
Şekil 3.3. Transesterifikasyon denkleminin kimyasal Yapısı.....	15
Şekil 3.4. Baz katalizli ester değişimi reaksiyonuna ait genel proses.....	16
Şekil 3.5. Ön iyileştirme reaksiyonu.....	18
Şekil 4.1. Hassas terazi.	23
Şekil 4.2. Manyetik karıştırıcı sıcaklık kontrollü ısıtıcı.	24
Şekil 4.3. Metil alkol ve asidin karıştırılması.	27
Şekil 4.4. Transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilmesi.....	29
Şekil 4.5. Transesterifikasyon reaksiyonu sonrası faz ayrışımı	30
Şekil 4.6. Transesterifikasyon reaksiyonu sonrası yıkama işlemi.	30
Şekil 4.7. Motor test sisteminin fotoğrafı	37
Şekil 4.8. Motor test sisteminin şematik görünüşü	37
Şekil 4.9. Test motoru.....	38
Şekil 4.10. Tork ölçüm ünitesi.....	39
Şekil 4.11. Ekzoz gaz emisyon cihazı.....	40
Şekil 4.12. Silindir basınç sensörü ve amplifikatör	41
Şekil 4.13. Yakıt hattı basınç sensörü ve yükseltici	41
Şekil 4.14. Enkoder.....	42
Şekil 4.15. Veri toplama cihazı (Kistler KiBox).....	43
Şekil 5.1. Yakıt hattı basıncı değişimleri.	51
Şekil 5.2. Tam yükte, 2000 d/d'da silindir basıncı değişimi	54
Şekil 5.3. Tam yükte, 2500 d/d'da silindir basıncı değişimi	54
Şekil 5.4. Tam yükte, 3000 d/d'da silindir basıncı değişimi	55
Şekil 5.5. Tam yükte, 2000 d/d'da ısı salınımı değişimi	56
Şekil 5.6. Tam yükte, 2500 d/d'da ısı salınımı değişimi	56
Şekil 5.7. Tam yükte, 3000 d/d'da ısı salınımı değişimi	57
Şekil 5.8. Tam yükte motor momentlerinin devre göre değişimi	58
Şekil 5.9. Tam yükte özgül yakıt tüketimlerinin devre göre değişimi.....	59
Şekil 5.10. Isıl verimlerin değişimi.....	60
Şekil 5.11. CO emisyonu değişimi	61
Şekil 5.12. NO _x emisyonu değişimi.....	62
Şekil 5.13. İş emisyonu değişimi	63

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Bazı yağ asitlerinin kimyasal yapısı.....	14
Çizelge 3.2. Amerika ve avrupada biyodizel standartlar.....	19
Çizelge 4.1. Hindi rendering yağının özellikleri.....	25
Çizelge 4.2. Hindi rendering yağının yağ asidi bileşenleri.....	26
Çizelge 4.3. Testlerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri....	38
Çizelge 4.4. Egzoz gaz emisyon cihazı.....	40
Çizelge 5.1. Hindi rendering yağı biyodizelin özellikleri.....	50
Çizelge 5.2. Püskürtme ve yanma karakteristikleri.....	53
Çizelge 5.3. Maksimum silindir basıncı ve ısı salınımı değerleri ve yerleri.....	57



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

Semboller

%	yüzde
°C	santri grad derece
be	ölgül yakıt tüketimi
cs	senti stokes
d/d	devir/dakika
g	gram
H _u	alt ısı değeri
km/h	kilometre/saat
kW	kilo watt
mL	mili litre
m _y	yakıt tüketimi
n	motor devri
Nm	newton metre
P _e	efektif güç
ppm	milyonda bir
η _t	ısı verim
ω	açısı hız

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Birliğı
B0	%100 motorin
B10	%10 Biyodizel %90 Motorin
B20	%20 Biyodizel %80 Motorin
B50	%50 Biyodizel %50 Motorin
C ₆ H ₅ CH ₃	Toluen
CH ₃ OH	Metil Alkol
CO	Karbonmonoksit
COOH	Karboksil Asit
EN	Avrupa Birliğı Standartları
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
HRYB	Hindi Rendering Yağı Biyodizeli
KOH	Potasyum Hidroksit
KOMe	Potasyum Metoksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
NaOMe	Sodyum Metoksit
NO _x	Azot Oksitler
°KMA	Krank Mili Açısı
ÖYT	Ölgül yakıt tüketimi (gr/kWh)
PKDY	Petrol kökenli dizel yakıtı
PM	Partikül Madde
SYA	Serbest yağ asidi
TG	Tutuşma gecikmesi

TEŐEKKÖR

Bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen, çalıőmama yardım eden, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım saygı değer hocam Dr. Öğr. Üye. Alaattin Osman EMİROğLU'na ve bilgisinden faydalandığım Dr. Öğr. Üye. Ahmet KESKİN hocama sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca annem Ferihan TÖRK, babam Ahmet TÖRK, kardeőlerim Erol TÖRK, Birol TÖRK ve Eőim Esra MAęAT TÖRK'e manevi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Saygılarımla
şenol TÖRK

1. GİRİŞ

Petrol kaynaklarının azalması, petrol fiyatlarının artması ve motorlu taşıtlardan kaynaklı hava kirliliğinin tehlikeli boyutlara gelmesinden dolayı alternatif yakıtlara olan ilgi her geçen gün daha da artmaktadır.

Her ülke, gelecekte alternatif olarak ne çeşit bir yakıt kullanacağını ve bu yakıtın rezerv durumunun ne seviyede olduğunu iyi hesap etmek mecburiyetindedir. Geleceğin yakıt türünün seçimini etkileyen en önemli faktörlerin başında, rezervlerin büyüklüğü kadar, yakıtın ekonomikliği ile fiziksel ve kimyasal özelliklerinin uygun olması gelmektedir. Bununla birlikte, yakıtın yanması sonucunda meydana gelen kirlетici emisyonların insan ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri de alternatif yakıtın çeşitini belirlemede sınırlayıcı bir etken olacaktır (Alptekin ve Çanakçı, 2011).

Enerji politikalarında temel alınması gereken kriter; teknolojik ve sosyal ilerlemeyi destekleyecek şekilde enerji ihtiyacını karşılamak üzere devamlı, sağlam, kaliteli, temiz ve ucuz enerji türlerine yönelmektir (Haşimoğlu, 2005). Günümüzde yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği artmakta, birçoğu ucuz alternatif olmak açısından değer kazanmakta, bir kısmı üzerinde de ekonomik analizler yapılmakta ve her gün başka enerji kaynakları meydana gelmektedir. Bu kaynakların hemen hemen tamamının ortak özelliği çevreye kısa ve uzun vadede olumsuz sonuçlar doğurmamasıdır (Artukoğlu, 2006).

Geçmişte ilk olarak Rudolf Diesel icat ettiği dizel motorda yakıt olarak Afrika kökenli yer fıstığı yağını kullanmasına rağmen, günümüze kadar enerji içeriği daha yüksek olan fosil kökenli yakıtlar, dizel motorlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Oksijenli yakıtların egzoz emisyonlarının az olması ve artan çevre bilinci biyodizel olarak adlandırdığımız yağ asitlerinin dizel motorlarında kullanılması 1980'li yıllarda tekrar gündeme getirmiştir. Özellikle bitkisel yağlar bazı kritik zamanlarda (1930-1940, 1973 petrol krizi gibi) sadece acil durumlarda

dizel motorlarda kullanılmıştır. Ancak bitkisel yağların dizel yakıtı kıyasla viskozitelerinin ve moleküler ağırlığının daha yüksek olması, zayıf yakıt atomizasyonuna; içeriğinde gliserini bulundurması, silindir içerisindeki tortulara, yapışan maddelere, karbon birikmesine neden olmaktadır. Bu durum, bitkisel yağ kullanılan motorlarda ciddi sorunlar ortaya çıkarmıştır. Bitkisel, hayvansal veya atık bitkisel yağların dizel motorunda herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi için dizel yakıtı benzer özelliklere sahip bir yakıtı dönüştürölmesi gerekmektedir (Özsezen ve Çanakçı, 2009).

Hayvansal atık yağların da direkt enjeksiyonlu dizel motorlarında kullanılmaları, başta viskozite olmak üzere, istenmeyen çeşitli fiziksel özellikleri sebebi ile kısıtlı ölçüdedir. Hayvansal yağların viskozite değerleri, dizelden daha fazladır. Bu nedenle bu tür yağlar eksik yanmaya, enjektör valf yuvaları üzerinde karbon birikmesine ve motor sorunlarına sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu tür yağların viskozite değerlerinin düşürölmesi gerekmektedir.

Biyodizel dizel motorlar için temiz ve umut verici alternatif bir yakıt olarak düşünölmektedir. Biyodizel kütleel olarak yaklaşık %10-15 oksijen içermektedir. Biyodizel, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilen ve toksik olmayan bir yakıttır ve petrol kökenli dizel yakıtı ile benzer bir yanma davranışlarına sahiptir. Bu sebeple dizel motorlarda direkt olarak veya dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılabilir. Biyodizel, bitkisel yağlı tohumlardan (kanola, keten, pamuk, soya fasulyesi, yer fıstığı, kolza, hindistan cevizi ve palmiye bitkilerinden), kullanılmış atık kızartma yağlarından, hayvansal yağlardan ve her çeşit biyolojik kökenli yağlardan bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyon sonucunda oluşan ve yakıt olarak kullanılan yağ asidi metil esterlerdir (Altınsoy, 2007).

Yüksek kaliteli rafine bitkisel yağların biyodizel hammaddesi olarak kullanılması, biyodizeli motorından daha yüksek fiyatlı hale getirmektedir. Fiyat dengesini sağlayabilmek için, daha ucuz maliyetli hammaddeler tercih edilmelidir. Yenilebilir ve kullanılmamış bitkisel yağların fiyatları hayvansal yağlarından çok

daha fazladır. Bu sebele atık hayvansal yağların biyodizel üretiminde kullanılması biyodizelin maliyetini oldukça düşürecektir (Alptekin ve Çanakçı, 2011).

Bu çalışmanın amacı, hindi kesimhanesi rendering yağlarından, petrol kökenli dizel yakıt özelliklerine benzer, temiz, ekonomik alternatif bir yakıt olan biyodizel üretmek ve böylece atık yağları değerlendirerek ülke ekonomisine katkı sağlamaktır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk olarak bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi ve farklı katalizörlerin biyodizel üretimindeki etkileri üzerine literatür de yapılan çalışmalardan bahsedilecektir. Daha sonra, bitkisel ve hayvansal yağlardan pilot ölçekli biyodizel üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar üzerinde durulacaktır. Son kısımda ise, biyodizelin dizel motorlarda kullanılmasının motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma davranışlarının incelendiği çalışmalardan bahsedilecektir.

Dias ve arkadaşları, hayvansal yağların biyodizel üretimi için ideal reaksiyon şartlarını incelemişlerdir (Dias, 2009). Öncelikle domuz yağı artıklarından elde edilen hayvansal yağın karakterizasyonunu belirlemişlerdir. Hayvansal yağın asit değeri 14 mgKOH/g olarak ölçülmüştür. Bu değer bitkisel yağların asit değerinden oldukça fazladır. Hayvansal yağın asit değerini düşürmek amacıyla öncelikle yağa ön iyileştirme işlemi uygulamışlardır. İyileştirme işlemi için, kullanılan toplam yağın ağırlığına göre asit katalizör miktarı seçilmiştir. Asit katalizörü olarak sülfürik asit (H_2SO_4) kullanmışlardır. Ön iyileştirme reaksiyonunda %2 H_2SO_4 , 6:1 alkol-yağ molar oranı kullanılmış ve farklı sıcaklıklarda (45°C, 55°C ve 65°C) reaksiyonlar elde edilmiştir. Fakat 65°C'lik ve 5 saatlik reaksiyon sonunda bile asit değeri sadece 10 mgKOH/g olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre asit katalizörünün miktarı %2'den %3'e çıkarılmıştır. %3 oranında asit katalizör kullanıldığı zaman, 65°C'de ve 3 saatlik reaksiyon sonunda asit değeri 3 mgKOH/g bulunmuştur. Daha sonra %1 sodyum hidroksit (NaOH), 6:1 alkol-yağ molar oranı kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Üç saat transesterifikasyon işlemi sonrasında ürün eldesi %46 olurken, viskozitesi 4,72 mm²/s ve ester içeriği %92 bulunmuştur.

Berchmans ve Hirata, yüksek serbest yağ asidi (SYA) içeriğine sahip hint fıstığı yağından (%14,9 SYA), palmye (%6,1 SYA) ve fındık yağından (%1,2 SYA) biyodizel üretmişlerdir (Berchmans, 2008). Katalizör olarak NaOH kullanılan baz katalizörlü reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Bunun için kullanılan yağın miktarı esas alınarak, farklı katalizör miktarlarında farklı alkol (metanol) oranlarında reaksiyonlar yapılmıştır. Reaksiyon sıcaklığını 65°C ve reaksiyonun zamanı ise 2 saat olarak

seçilmiştir. 15 cm³ gibi çok düşük yağ miktarlarında çalıştıkları için, ester yıkama işlemini bu çalışmanın dışında bırakılmışlardır. Fındık yağı ve palmye yağı için en yüksek ürün eldesi, %1 NaOH ve %28 metanol miktarı şartlarında gerçekleşmiş ve ürün eldeleri sırasıyla %85 ve %80 olmuştur. Yüksek SYA içeriğine sahip hint fıstığı yağı için ise daha yüksek katalizör miktarlarına ihtiyaç duyduklarını belirtmişlerdir. Hint fıstığı yağı için en uygun reaksiyon şartları, %3,3 katalizör ve %70 alkol miktarı olarak belirlenmişlerdir. Bu durumda bile ürün eldesi %55 olarak görülmüştür. Ürün eldesinin çok düşük olması ile birlikte, hint fıstığı yağının içerisindeki SYA analiz edilmiştir. Buna göre %14,9 SYA içeren hint fıstığı yağının, SYA dağılımı şu şekilde belirlenmiştir; %2,4 palmitik, %6,9 linoleik, %5,4 oleik ve %0,2 stearik asittir. Ürün eldesinin artırılması için bu aşamada iki adımlı üretime geçmişlerdir. Öncelikle hint fıstığı yağına ön iyileştirme uygulanmış ve yağın SYA değeri düşürülmüştür. Ön iyileştirme reaksiyonu için yağın ağırlığının %1'i kadar H₂SO₄ ve farklı metanol miktarları kullanılmış, reaksiyon sıcaklığı 50°C ve reaksiyon zamanı ise 1 saat olarak seçilmiştir. %70 alkol miktarında SYA değeri %1 seviyesine indirilmiştir. SYA miktarı %1 seviyesine indirildikten sonra baz katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu yapılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonu için reaksiyon sıcaklığı 65°C ve reaksiyon zamanı ise 2 saat olarak sabit tutulduğunda, en ideal reaksiyon şartları %1,4 NaOH ve %24 metanol miktarı olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda ürün eldesini %90 olarak tespit etmişlerdir.

Chung ve arkadaşları, biyodizel üretiminde hammadde olarak bir restorandan aldıkları ördek yağının kullanımını araştırmışlardır (Chung, 2009). Ördek yağından biyodizel üretimi için üç farklı baz katalizör olarak potasyum hidroksit (KOH), NaOH ve katı haldeki sodyum metoksit (NaOMe) kullanmışlardır. En uygun reaksiyon şartlarını belirlemek amacıyla katalizör miktarı, metanol-alkol oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresini değiştirerek reaksiyonları gerçekleştirmişlerdir. Yağın ağırlığının %1'i kadar KOH kullanılarak, 3:1 metanol yağ molar oranında, 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 3 saatlik reaksiyon sonunda ester içeriği %75 bulunmuştur. Metanol-yağ molar oranı 6:1'e çıkarılmış ve böylelikle ester içeriği %97'ye yükselmiştir. Reaksiyon sonrasında farklı katalizörlerle üretilen biyodizellerin yağ asidi dağılımlarını incelemişlerdir. Ördek yağının reaksiyon öncesi yağ asidi dağılımının büyük kısmı 3 yağ asidinden oluştuğunu görmüşlerdir. Ördek

yağındaki oleik asit (C18:1) miktarını %59, linoleik asit (C18:2) miktarını %19,6 ve palmitik asit (C16:0) miktarını ise %17 olarak belirlemişlerdir. Yağın ağırlığının %1'i kadar baz katalizörü kullanılarak, 6:1 metanol-yağ oranında, 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 3 saatlik reaksiyon sonunda ördek yağındaki oleik yağ asitleri, KOH, NaOH ve NaOMe katalizörleri için sırasıyla %72,5, %71,5 ve %71,9'a yükselmiştir. Aynı sırayla, linoleik asit miktarları %2,2, %1,5 ve %1,6'ya düşmüş, palmitik asit miktarları ise %24,2, %26,0 ve %25,8'e yükselmiştir. Aynı reaksiyon şartlarında üretilen biyodizellerin viskoziteleri ise KOH, NaOH ve NaOMe katalizörleri için sırasıyla 5,5, 6,0 ve 5,8 mm²/s olarak belirlenmiştir. Ancak yakıt özelliklerini ayrıntılı olarak bu çalışmada karakterize etmemişlerdir.

Marchetti ve Errazu, rafine ayçiçekyağı ve oleik asit karışımından biyodizel üretmişlerdir (Marchetti, 2008). Oluşturulan karışımın SYA değeri yaklaşık olarak %10,7 bulunmuştur. Daha sonra, asit katalizör eşliğinde kullandıkları yağın SYA değerini düşürmek istemişlerdir. Serbest yağ asitlerini estere dönüştürmek için asit katalizör olarak H₂SO₄ kullanmışlardır, alkol olarak ise etanol kullanmışlardır. Oluşturulan karışımın ilk SYA değerinden, reaksiyon sonrası SYA değerinin çıkartılmasından sonra kalan değer karışımın ilk SYA değerine bölünmesi ile elde edilen değeri SYA dönüşümü olarak adlandırmışlardır. Reaksiyon için alınan toplam yağ karışımın %2,3'ü kadar asit katalizörü kullanılarak, 45°C sıcaklıkta, farklı etanol-yağ molar oranında ve farklı sürelerde reaksiyonları gerçekleştirmişlerdir. Alkol miktarı ve reaksiyon süresinin artması ile SYA dönüşüm oranında artmıştır. Bir saatlik reaksiyon sonunda ve 10,052:1 alkol-yağ molar oranında SYA dönüşümü %95'in üzerinde bulunmuştur. Katalizör miktarının SYA üzerindeki etkisini incelemek için 45°C reaksiyon sıcaklığında, 6,124:1 metanol-yağ oranında, %1,026, %2,261 ve %5,139 olmak üzere üç farklı katalizör miktarı seçmişlerdir. Katalizör miktarının ve reaksiyonun zamanının arttırılmasıyla SYA dönüşümü artarken, %5,139 katalizör kullanılarak yapılan bir saatlik reaksiyon sonrasında ise SYA dönüşümü %95 seviyesine çıkmıştır. Bu işlemin ardından reaksiyon için alınan toplam yağ karışımın %2,3'ü kadar asit katalizör kullanarak ve 6,124:1 metanol-yağ molar oranında farklı sıcaklıklarda, reaksiyon sıcaklığının SYA dönüşümüne etkisini incelemişlerdir. 35°C, 45°C ve 55°C reaksiyon sıcaklıkları arasında en yüksek SYA dönüşümünün 55°C'de gerçekleştiğini görmüşlerdir.

Rashid ve arkadaşları, pamuk yağından biyodizel üretimi için ideal reaksiyon parametrelerini incelemişlerdir (Rashid, 2009). Pamuk yağının asit değerinin 0,91 mgKOH/g ve su içeriğinin %0,03 olması nedeni ile doğrudan transesterifikasyon reaksiyonuna katalizör olarak NaOH, KOH, NaOMe ve KOMe, alkol olarak ise metanol kullanmışlardır. Yapılan ilk reaksiyonlar 6:1 metanol-yag molar oranında, 600 d/d'da, 65°C reaksiyon sıcaklığında ve farklı reaksiyon sürelerinde gerçekleştirmişlerdir. Bu reaksiyonlar sonucunda en yüksek ürün eldesi NaOMe ile sağlanmış ve buna bağlı olarak sonraki reaksiyonları bu katalizör ile gerçekleştirmişlerdir. Daha sonraki reaksiyonları ise yine 6:1 metanol-yag molar oranında 600 d/d.'da, 65°C reaksiyon sıcaklığında, farklı reaksiyon süresinde ve farklı NaOMe miktarlarında (%0, %0,25, %0,50, %0,75, %1,00, %1,25 ve %1.50) gerçekleştirmişlerdir. En yüksek ürün eldesine %0,75 NaOMe kullanılarak ulaşılmıştır. Buna göre farklı metanol-yag molar oranları (3:1, 6:1, 9:1, 12:1 ve 15:1), farklı reaksiyon devirleri (180, 360 600 ve 720 d/d) ve farklı reaksiyon sıcaklıklarında(25°C, 50°C ve 65°C) gerçekleştirmişlerdir. Optimum reaksiyon şartları %0,75 NaOMe, 6:1 metanol-yag molar oranı, 65°C reaksiyon sıcaklığı, 600 d.d-1 reaksiyon devri ve 90 dakikalık reaksiyon zamanı olarak belirlenmiş ve bu koşullarda ürün eldesi %96,8olarak tespit edilmiştir. En uygun reaksiyon parametrelerine göre üretilen biyodizelinbirçok yakıt özellikleri ölçülmüş ve yakıt özelliklerinin uluslararası biyodizelstandartlarını sağladığını tespit emişlerdir.

Bhatti ve arkadaşları, atık tavuk yağı ve koyun yağından biyodizel üretimi için en uygun şartları araştırmışlardır (Bhatti, 2008). Bunun için reaksiyonlarda asit katalizörü olarak H₂SO₄, baz katalizörü olarak da KOH kullanmışlardır. Asit katalizörlü reaksiyonlar için kullanılan yağın ağırlığının %25, %50 ve %100'ü kadar H₂SO₄, kullanılan yağın ağırlığının 30 katı hacimsel metanol (5 g yağ için 150 mL metanol) kullanmışlar ve dört farklı reaksiyon sıcaklığı (30°C, 40°C, 50°C ve 60°C) seçmişlerdir. Baz katalizörlü reaksiyonlar için ise üç çeşit metot kullanmışlardır. Birincisinde, 120 g yağ, 1,8 g KOH ve 33,5 ml metanol kullanılmış ve 30°C reaksiyon sıcaklığında 60 dakika reaksiyon gerçekleştirilmiştir. İkincisinde, 120 g yağ, 2,5 g KOH ve 24 mL metanol kullanılmış ve oda sıcaklığında 60 dakika reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Üçüncüsünde ise 50 g yağ, 0,5 g KOH ve 11,25 g metanol kullanılmış ve oda sıcaklığında 120 dakika reaksiyon gerçekleştirilmiştir.

Biyodizel üretiminde 5 gr tavuk yağı için en uygun şartlar; reaksiyon sıcaklığı 50°C, yağ/alkol oranı 1:30 ve H₂SO₄ miktarı 1,25 g olarak, aynı şekilde 5 g koyun yağı için uygun şartlar; reaksiyon sıcaklığı 60°C, alkol-yağ molar oranı 1:30 ve H₂SO₄ miktarı 2,5 g olarak belirlenmiştir. Optimum şartlar altında, 24 saatte tavuk ve koyun yağı için sırasıyla %99,01 ± 0,71 ve %93,21 ± 0,71 ürün eldesi sağlamışlardır. 60°C sıcaklığın üzerindeki reaksiyonlar için H₂SO₄ kullanılmamasını önermişlerdir. Çünkü bu sıcaklığın üzerinde sülfürik asidin yağı yakarak ürün eldesini düşürdüğü ifade edilmiştir. Baz katalizörlü reaksiyonlarda ise en yüksek ürün eldesini sağlamışlardır (%88,14 tavuk yağı için ve %78,33 koyun yağı için). Üretilen biyodizellerin bazı özelliklerini ölçmüşler ve bu özelliklerin uluslararası biyodizel standartlarını karşıladığını belirtmişlerdir.

Reyes ve arkadaşları (Reyes, 2006). somon balığı yağından elde ettikleri ham biyodizel–dizel karışımı ve rafine edilmiş biyodizel–dizel karışımlarının beraber kullanıldığı motorun güç performansını ve partikül madde emisyon performansını üzerinde çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, çok fazla YSA içeren somon balığı yağından biyodizel üretimini iki aşamada gerçekleştirmişlerdir. Birinci aşamada, somon balığı yağını sülfürik asit katalizörlüğünde metanol ile 60°C’de 65 dakikada, ikinci aşamada da sodyum hidroksit katalizörü ile 55°C’de 60 dakika reaksiyona sokmuşlardır ve elde ettikleri biyodizeli 70°C’de 30 dakika ısıtmışlardır. Elde edilen biyodizelin viskozitesi 4,96 cs, erime noktasını -11°C olarak bulunmuştur. Biyodizel rafine edildikten sonra viskozitesi 3,46 cs, erime noktasını -10,5°C olarak bulmuşlardır. Ham biyodizel ve rafine edilmiş biyodizel, güç ile parçacık emisyonunun ölçülmesi için dizel motorunda test etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, %100 rafine biyodizel kullanıldığı zaman dizel yakıtı oranla maksimum güç kaybının %3,5 ve partikül madde emisyonunun da yaklaşık %50 azalma olduğunu, ham biyodizel veya rafine biyodizel içeren karışımlarda ise güç kaybının daha da az olduğunu fakat partikül madde emisyonunda ise azalma olduğu tespit edilmiştir.

Kondamudi ve arkadaşları, biyodizel üretmek için tavuk yağını seçmişlerdir (Kondamudi, 2009). İlk aşamada tavuk yağından biyodizel üretiminde yağın içerdiği SYA miktarını düşürmüşler. Bunun için ilk aşamada katalizör olarak KOH kullanmışlar, bunun neticesinde SYA’lerini sabuna dönüştürmüşlerdir. Oluşan bu

sabun tabakası alındıktan sonra yağın içindeki su, ısıtılarak uzaklaştırılmış ve yağ transesteri reaksiyona hazır hale gelmiştir. Yağın SYA değeri hakkında ise herhangi bir bilgi verilmemiştir. Metanol-yağ oranı 9:1, KOH miktarı %1, reaksiyon sıcaklığı 70°C ve 60 dakika reaksiyon sonunda ürettikleri biyodizelin toplam ve serbest gliserin değerlerinin standartlara uygun çıktığını belirtmişlerdir. Fakat soğuk akış özellikleri incelendiğinde akma noktasının 6°C olduğu görülmektedir. Bu değer kış şartlarında kullanım için engel teşkil edecektir. Üretilen biyodizelin yağ asidi dağılımına bakıldığında yağ asidi dağılımını oluşturan yağ asitlerinin miktarı; palmitik asit (C16:0) miktarı %28,86, stearik asit (C18:0) miktarı %10,06, oleik asit (C18:1) miktarı %46,10 ve linoleik asit (C18:2) miktarı %14,44 olarak belirlenmiştir

Kolomaznik ve arkadaşları, deri sanayi atıklarının biyodizel üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır (Kolomaznik, 2009). Yapılan bu çalışmada kullanılan deri yağlarının asit değeri 10,6 mgKOH/g olarak belirlenmiştir. Deri yağının erime noktasını 19,9°C olarak tespit etmişlerdir. Deri yağlarından biyodizel üretimi için öncelikle doğrudan transesterifikasyon reaksiyonunu tercih etmişler ve bu reaksiyonda, alkol olarak metanol, katalizör olarak ise KOH kullanılmışlardır. Fakat deri yağının asit değerinin yüksek olması, sabunlaşmaya neden olmuş ve ester eldesi %40'a kadar düşmüştür. Oldukça düşük olan bu değerini yükseltebilmesi için, katalizör olarak tetramethylammonium hidroksit ($C_4H_{13}NO$) kullanmışlardır. Bunun yanında ester eldesi bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çolak ve arkadaşları, koyun derilerinden sıyrılmış atıkları belirli işlemde geçirerek elde ettikleri deri yağlarını biyodizel üretiminde kullanmışlardır (Çolak, 2005). Deri sıyrıklarından deri yağı elde edebilmek için öncelikle deri sıyrıklarını küçük parçacıklar haline getirmişlerdir. Bu parçaları, içine su ilave ettikten sonra bir makinede 120 dakika boyunca yüksek hızda karıştırmışlar ve kaynatmışlardır. Ayırma kabına aldıkları yağ-su karışımından yağ kısmını ayırmışlardır. Daha sonra bu yağ, suyun uzaklaştırılabilmesi için iki saat boyunca ısıtılmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen deri yağının asit değeri 2,4 mgKOH/g olarak belirlenmiştir. Elde ettikleri deri yağındaki oleik asit (C18:1) miktarı %41,08, palmitik asit (C16:0) miktarı %20,59, stearik asit (C18:0) miktarı %8,36, palmitoleik asit (C16:1) miktarı %4,6, miristik asit (C14:0) miktarı %3,05 ve linoleik asit (C18:2) miktarı %2,97

olarak belirlenmiştir. Geriye kalan miktarı ise %19,35 miktarında diğer yağ asitleri oluşturmaktadır. Yağın asit değerinin düşürülmesinden sonra biyodizel üretimi için doğrudan transesterifikasyon işlemine başlanmıştır. Reaksiyonlarda katalizör olarak KOMe (alkol içinde %30), alkol olarak ise metanol kullanılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonu için 1000 g deri yağı, 137 g metanol ve 12,5 g KOMe kullanılmıştır. Reaksiyon sıcaklığı 70°C ve reaksiyon süresi 30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu reaksiyondan sonra ester-gliserin karışımı ayırma hunisine konulmuştur. Gliserin ayrıştırıldıktan sonra, biyodizel eldesini arttırmak amacıyla ester kısmı ikinci bir reaksiyona tabi tutulmuştur. Bu reaksiyonda 35 g metanol ve 6 g KOMe kullanılmıştır. Gliserin kısmı uzaklaştırıldıktan sonra ester kısmı sıcak su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Bu aşamadan sonra ürün eldesi yaklaşık %95 olmuştur. Elde edilen biyodizelin viskozite, parlama noktası, asit değeri, bakır şerit korozyon, iyot sayısı ve yoğunluk gibi bazı yakıt özelliklerini ölçmüşler ve bu değerlerin biyodizel standartlarına uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, deri yağı biyodizelin kükürt içeriği 80 ppm olduğu görülmüş ve bu değerin EN 14214 biyodizel standartlarına uygun çıkmadığı belirtilmiştir.

Özgünay ve arkadaşları, deri yağından ürettikleri biyodizeli Fiat Doblo (maksimum torku 118 Nm, dört silindirli, 1,9 L hacimli dizel motorlu) aracında şasi dinamometresi kullanıp test etmişlerdir (Özgünay, 2007). Öncelikle üretilen deri yağı biyodizelin bazı yakıt özellikleri belirlenmişlerdir. Belirlenen yakıt özellikleri uluslararası biyodizel standartlarına uygun çıkmıştır. Fakat üretilen biyodizelin bulutlanma noktası 10°C olarak belirlenmiştir. Bu durum yakıtın kışın kullanılamayacağı anlamına gelmekte, aynı zamanda hayvansal yağların doymuşluğunda yüksek olduğunu göstermektedir. Elde edilen deri yağı biyodizeline, palmitik asit (C16:0) miktarı %20,59, oleik asit (C18:1) miktarı %41,8, palmitoleik asit (C16:1) miktarı %4,6, stearik asit (C18:0) miktarı %8,36, miristik asit (C14:0) miktarı %3,05 ve linoleik asit (C18:2) miktarı %2,97 olarak belirlenmiştir. Motorin ve %100 biyodizel kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Yapılan testlere göre maksimum motor gücü motorin için 38 kW iken, B100 için 37,5 kW olarak belirlenmiştir. Aracın 0 km/h hızından 100 km/h olan ivmelenmesine bakıldığında ise motorin ile ivmelenmenin arada belirgin bir farkın olmaması ile birlikte daha kısa zamanda gerçekleştiği görülmüştür. Yapılan emisyon testleri

sonunda, karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonlarında belirgin bir azalma, karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x) emisyonlarında ise bir miktar artış görülmüştür.



3. BİYODİZEL VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Günümüzde alternatif yakıtlarlar arasında en dikkat çekici olan biyodizeldir. Bu bölümde, öncelikle bitkisel ve hayvansal yağların özellikleri, biyodizel üretimi, yağ potansiyelleri ve biyodizelin Türkiye’deki durumu hakkında bilgi verilmiştir.

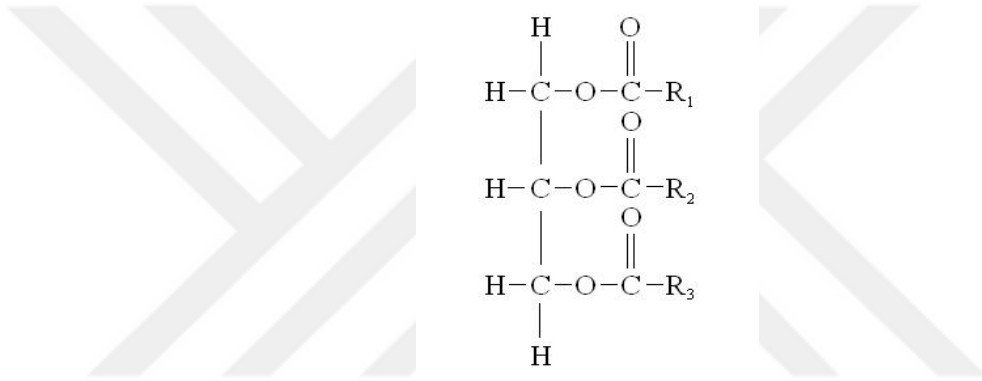
3.1 Biyodizel

Biyodizel, bitkisel veya hayvansal yağ kaynaklarından elde edilebilen alternatif bir dizel yakıttır. Biyodizel, bu yağların alkol ve katalizör ile reaksiyona sokulmasıyla üretilmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından petrol kökenli dizel yakıtlarına benzer özellikler göstermektedir. Biyodizel, dizel motorlarında saf olarak tek başına kullanılabildiği gibi petrol kökenli dizel yakıtlarıyla karıştırılarak da kullanılabilmektedir. Saf biyodizel kullanıldığında B100 olarak isimlendirilirken, %20 biyodizel ve %80 dizel yakıtı içeren bir karışım B20, %50 biyodizel ve %50 dizel yakıtı içeren bir karışım B50 olarak adlandırılmaktadır. Biyodizelin hammaddesi olan bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal yapısı biyodizelin yakıt özelliklerine de etki etmektedir. Bu sebeple, bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal yapısı da bilinmelidir.

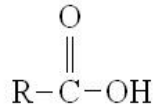
3.1.1 Bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal yapısı

Biyodizelin hammaddesi olan bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal yapısı üretilen biyodizelin özelliklerine etki etmektedir. Bitkisel ve hayvansal yağların büyük kısmı genellikle trigliseritlerden meydana gelmektedir. Trigliseritler, üç yağ asidinin birgliserol molekülüyle birleşmiş halidir. Hayvansal veya bitkisel veya yağlar içerdiği yağasitlerinin gliserol molekülü ile bağlanış şekillerine göre birbirinden ayrılmaktadır. Eğer yağ asidi bir tane çift karbon bağı içeriyorsa, tekli doymamış yağ asidi, iki veyadaha fazla çift bağı içeriyorsa, çoklu doymamış yağ asitleri olarak adlandırılmaktadır (Caringal, 1989). Aşağıdaki Şekil 3.1’de bir

trigliseridin kimyasal yapısı görülmektedir. Şekilde görülen R harfleri yağ asitlerini simgelemektedir. Yağ asitleri, karbon ve hidrojenatomlarından meydana gelmiş, karboksil asit içeren bir grup kimyasal bileşik olarak tanımlanmaktadır. Karboksil asit (COOH) ise bir yağ asidinin sonunda bulunan kimyasal bir gruptur. COOH asit bir proton kaybedip COO⁻ olabilir ya da bir alkol grubu ile birleşerek ester oluşturabilirler. İçerdiği karbon atomlarının sayısı, çift bağların sayısı ve zincir üzerindeki yeri bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Eğer yağ asitleri diğer bileşiklerle bir bağ oluşturmazsa, serbest yağ asidi olarak isimlendirilirler (Stauffer, 1996). Şekil 3.2’de bir yağ asidinin kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Trigliseridin kimyasal yapısı.



Şekil 3.2. Yağ asidinin kimyasal yapısı.

Palmitik (16:0) ve stearik asit (18:0) en çok bilinen iki doymuş yağ asididir. Bütün bitkisel yağlar, bu yağ asitlerinden en azından birini içermektedir. Benzer olarak, oleik asit (18:1) bilinen tekli doymamış yağ asididir. Ayrıca bütün yağlar, bir miktarlinoleik asit (18:2) ve linolenik (18:3) asit içerebilirler. Çizelge 3.1’de yağ asitlerinin kimyasal yapıları görülmektedir (Goering, 1982). Yağ asitlerinin yapısı iki rakam ile gösterilmektedir. Birinci rakam, yağ asidinin toplam karbon atomu sayısını, ikinci rakam ise çift karbon bağ sayısını göstermektedir (Peterson, 1986).

Çizelge 3.1. Bazı yağ asitlerinin kimyasal yapıları

Yağ Asitleri	Karbon Sayısı
Miristik asit	C-14:00
Palmitik asit	C-16:00
Stearik asit	C-18:00
Oleik asit	C-18:01
Linoleik asit	C-18:02
Linolenik asit	C-18:03
Araşidik asit	C-20:00
Behenik asit	C-22:00
Erukik asit	C-22:01

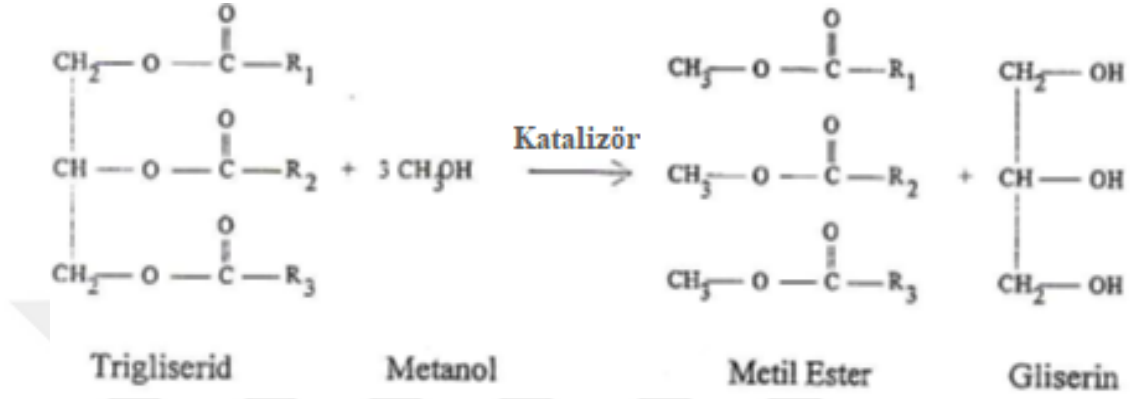
3.1.2. Bitkisel ve hayvansal yağlardan biyodizel üretimi

Bitkisel ile hayvansal yağlar dizel motorlarda kullanılabilen alternatif yakıtlardır. Günümüze kadar bitkisel veya hayvansal yağlar birçok araştırmacı tarafından dizel motorlarında denenmiştir. Fakat bitkisel veya hayvansal yağlar viskozitelerinin yüksek olması sebebiyle motorlarda kullanılması durumunda enjektörlerde karbon birikintileri, piston sekmanlarında yapışmalar gibi birçok motor sorunu meydana gelmektedir. Bu yüzden, bitkisel veya hayvansal yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemine gidilmiştir. Bu yağların yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili yapılan araştırmalar, öncelikle yağların viskozitelerini azaltmaya yönelik olmuştur. Yağların viskozitelerinin azaltılmasında seyreltme, mikro emülsiyon oluşturma, piroliz (ayırıştırma) ve transesterifikasyon gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı transesterifikasyon yöntemidir.

3.1.2.1 Transesterifikasyon

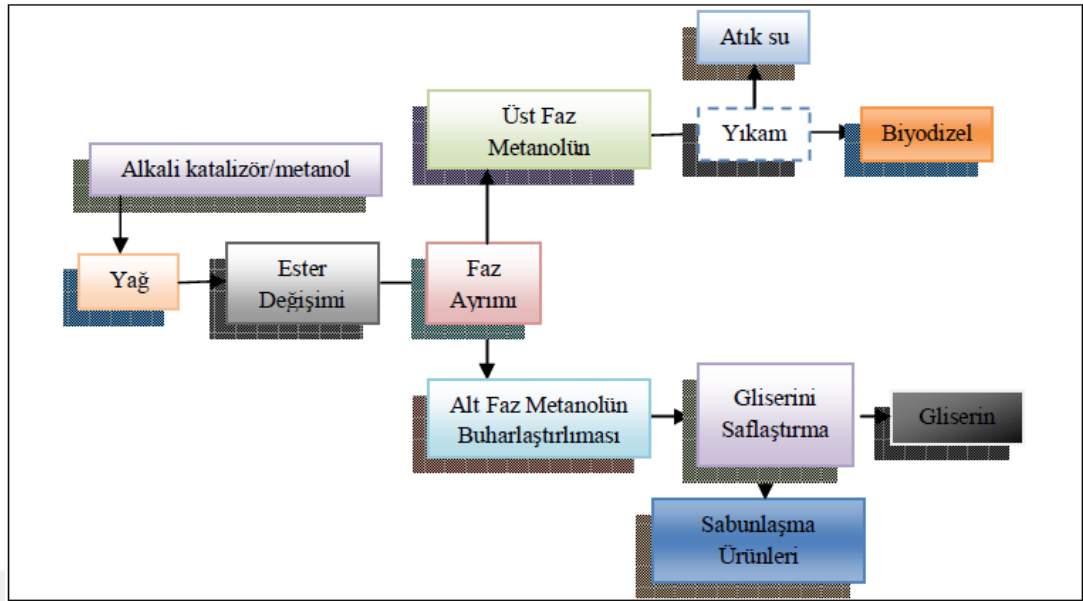
Bitkisel yağların uygun alternatif dizel yakıt haline getirilmesi için izlenen en önemli kimyasal yöntem transesterifikasyon veya diğer adıyla alkoliz reaksiyonudur.

Transesterifikasyon, bir hayvansal yağın küçük molekül ağırlıklı bir alkol-katalizör eşliğinde gliserin ve yağ asidi esteri oluşturmak amacıyla reaksiyona sokulmasıdır. Hayvansal yağlarda, özellikle yağ, metanol ve katalizörün birbiriyle çok iyi karıştırılması gerekmektedir (Kaplan, 2001).



Şekil 3.3. Transesterifikasyon işleminin kimyasal denklemi (Çildir, 2003).

Transesterifikasyon işlemini hızlandırmak için asidik ve bazik katalizörler ile enzimler kullanılmaktadır. Transesterifikasyon işleminde baz katalizör kullanılmıştır. Bu yöntem ile biyodizel üretiminde aşağıdaki işlem basamakları takip edilmektedir. Şekil 3.4’te baz katalizörlü ester değişimi reaksiyonunun genel proses şeması görülmektedir.



Şekil 3.4. Baz katalizli ester değişimi reaksiyonuna ait genel proses (Yenioğlu,2009).

3.1.2.2 Proliz

Proliz veya kraking, kimyasal bağların daha küçük moleküller haline gelmek üzere kırılma işlemidir. Hayvansal yağların proliz ürünlerini elde etmek için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birisi, kapalı bir kapta hayvansal yağı ısı etkisiyle parçalara ayırma, diğeri ise standart ASTM distilasyonu ile ısı parçalamaktır. Bu ikinci yöntem ile yapılan çalışmada, hayvan yağından yapılan distilatın saf hayvansal yağ göre, dizel yakıtına daha yakın özellikler taşıdığı görülmüştür (Kaplan, 2001).

3.1.2.3 Emülsiyon Oluşturma

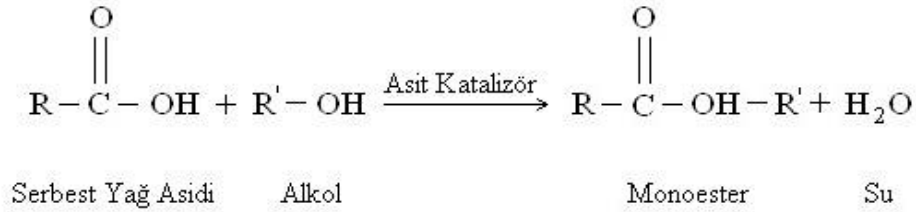
Hayvansal yağların viskozitesini düşürmek için, metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkollerle mikro emülsiyon oluşturma işlemidir. Mikro emülsiyon, normalde karışmayan iki sıvı ile bir veya daha fazla amfifilin biraraya getirilmesiyle oluşur. Bu yöntemle petrolden tamamen bağımsız alternatif dizel yakıtları meydana getirmek mümkün olmaktadır (Kaplan, 2001).

Bitkisel veya hayvansal yağların dizel motorlarında kullanılmasına engel olan en büyük sebeplerden birisi olan viskozite, transesterifikasyon reaksiyonu sonucu üretilen biyodizel ile beraber yaklaşık %90 oranında azaltılabilmektedir. Yoğunluk ise bir miktar düşmektedir. Bununla birlikte molekül ağırlığı, yağın molekül ağırlığının üçte birine inmekte ve uçuculuğunda ise iyileşmeler meydana gelmektedir. Aynı zamanda ısıl değerinde de artışlar gözlenmektedir.

Biyodizel üretiminde kullanılan en yaygın alkol, metanoldür. Ucuz olması ve öteki alkollere göre daha iyi sonuçlar vermesi, metanolü ön plana çıkarmıştır. Bununla birlikte, etanol, izopropil alkol ve bütil alkol gibi farklı alkoller de kullanılabilmektedir. Fakat farklı alkollerin kullanılması durumunda reaksiyon şartları değişmekte ve biyodizel üretimi zorlaşmaktadır. Ama motor performansında önemli bir farklılık görülmemiştir (Goering, 1982). Transesterifikasyon reaksiyonunda reaksiyonun tamliğini ve hızını arttırmak için katalizörler kullanılmaktadır. En çok kullanılan katalizörler potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum metoksit (KOME) ve sodyum metoksittir (NaOMe). Ayrıca, asit katalizör de kullanılabilmektedir. Asit katalizörler, transesterifikasyon reaksiyonunda alkali katalizörlere kıyasla daha yavaştır ve transesterifikasyon reaksiyonu için daha çok alkole gerek duyulmaktadır. En çok kullanılan asit katalizörler sülfürik asit, hidroklorik asit ve sülfonikasittir. Oda sıcaklığında asit katalizörlü bir transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleşirken, reaksiyon çok yavaş gerçekleşmiş ve ester dönüşümü düşük elde edilmiştir (Çanakçı, 2001).

Bitkisel yağların asit değerleri çoğunlukla 1 mgKOH/g'ın altındadır. Eğer yağın asit değeri 1 mgKOH/g ise, serbest yağ asidi miktarı yaklaşık olarak %0,5'tir. Atık bitkisel yağların kullanım anında özelliklerinin değişmesiyle birlikte SYA miktarı da artabilmektedir. Yüksek SYA içeren bir yağ alkali katalizörlerle reaksiyona sokulduğunda sabun oluşumu meydana gelmektedir. Serbest yağ asitleri ester dönüşümünü azaltırken, reaksiyon esnasında oluşan sabun, reaksiyon sonunda ester, gliserin ve yıkama suyunun ayrışmasına engel olmaktadır. Bu nedenle, SYA miktarı yüksek olan yağlar doğrudan alkali katalizör ile reaksiyona sokulmaz. Dolayısıyla, atık bitkisel veya hayvansal yağlar ile transesterifikasyon reaksiyonuna geçilmeden önce yapılacak işlem, yağın SYA miktarını belirlemek olacaktır. Serbest

yağ asidi miktarı %0,5'in üzerinde ise, alkali katalizörler yerine asit katalizörler kullanılmalıdır. Böylelikle SYA'leri estere dönüştürülür. Ön iyileştirme olarak adlandırılan bu adımla birlikte, yağın SYA miktarı düşürülmüş olmaktadır. Ön iyileştirme reaksiyonu için, alkol ve katalizör miktarı yağın içerdiği SYA miktarına göre belirlenmektedir. Yağın SYA miktarı istenilen değere indirildikten sonra transesterifikasyon reaksiyonuna başlanır. Ancak transesterifikasyon reaksiyonunda alkol ve katalizör miktarı reaksiyona girmemiş trigliserit miktarına bakılarak belirlenir. Asit katalizörler baz katalizörlere kıyasla çok daha yavaştır, fakat SYA'lerini estere dönüştürmede yeterince hızlı sayılabilir. Serbest yağ asidi miktarını düşürmek için asit katalizör kullanılması esnasında ortaya çıkan bir dezavantaj ise reaksiyon esnasında su oluşumudur. Su reaksiyonun tamliğini engellemektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi SYA'leri, bir asit katalizör ve alkol eşliğinde reaksiyona sokulur. Reaksiyon sonunda SYA'leri estere dönüştürken, bunun yanında su da oluşmaktadır. Oluşan bu suyun ön iyileştirme reaksiyonunun ardından uzaklaştırılması gerekmektedir.



Şekil 3.5. Ön iyileştirme reaksiyonu.

3.1.3 Biyodizel ve motorin yakıt standartları

Biyodizel üretimi için birçok farklı hammaddeler kullanılabilir. Amerika, biyodizel üretiminde hammadde olarak çoğunlukla soya yağını tercih ederken, Avrupa ise kanola yağını tercih etmektedir. Biyodizel üretiminde farklı hammaddelerin yanı sıra, farklı alkol ve katalizör de kullanılabilir. Ancak üretilen esterlerin biyodizel olarak adlandırılabilmesi, dizel motorlarında sorunsuz bir

Çizelge 3.2. Amerika (ASTM D6751) ve Avrupa (EN 14214) biyodizel standartları

Özellikler	Birim	ASTM D6751-11b	(EN 14214)	Standartlar
Yoğunluk (15°C)	kg/m ³	-	860 – 900	EN ISO 12185
Viskozite (40°C)	mm ² /s	1,9 – 6,0	3,5 – 5,0	EN ISO 3104 D445
Parlama Noktası	°C	93 min.	101 dak.	EN ISO 3679 D93
Setan Sayısı		47 min.	51 dak.	EN ISO 5165 D613
Su ve Tortu	% (hacimsel)	0,05 mak.	10 mak.	EN ISO 20884 D2709
Sülfür İçeriği S15 S500		15 mak. 500 mak.	-	D5453 D5453
Serbest Gliserin	% (kütleli)	0,02 mak.	0,02 mak.	EN 14105 D6584
Soğuk Filtreleme -12°C altında	saniye	360 mak. 200 mak.	-	D7501 D7501
Fosfor İçeriği	mg/kg	10 mak.	4 mak.	EN 14107 D4951
Asit Değeri	mgKOH/g	0,50 mak.	0,50 mak.	EN 14104 D664
Toplam Gliserin	% (kütleli)	0,24 mak.	0,25 mak.	EN 14105 D6584
Distilasyon %90 Geri Kazanım	°C	360 mak.	-	D1160
Sülfat Külü İçeriği	% (kütleli)	0,020 mak.	0,020 mak.	EN ISO 3987 D874
Karbon Kalıntısı (%100 Biyodizel)	% (kütleli)	0,050 mak.	0,30 mak.	EN ISO 10370 D4530
Oksidasyon Stabilitesi (110°C)	saat	3 min.	6 min.	EN 15751 EN1112
Bakır Şerit Korozyon(3h,50°C)	korozyon derecesi	No 3 mak.	No 1 mak.	EN ISO 2160 D130
Gurup I Metaller (Na+K)	mg/kg	5 mak.	5 mak.	EN14538
Gurup II Metaller (Ca+Mg)	mg/kg	5 mak.	5 mak.	EN 14538
Bulutlanma Noktası	°C	bölgesel		D2500
Metanol İçeriği	% (kütleli)	-	0,20 mak.	EN 14110
Monogliserit	% (kütleli)	-	0,80 mak.	EN 14105
Digliserit	% (kütleli)	-	0,20 mak.	EN 14105
Trigliserit	% (kütleli)	-	0,20 mak.	EN 14105
Ester İçeriği	% (kütleli)	-	96,5 min.	EN 14103
Linolenik asit metil ester içeriği	% (kütleli)	-	12,0 mak.	EN 14103
(≥ 4 Çift Bağ) Metil Ester içeriği	% (kütleli)	-	1 mak.	EN 15779
İyot Değeri	g I.100/g	-	120 mak.	EN 14111
Toplam Kirlilik	mg/kg	-	24 mak.	EN 12662
Su İçeriği	mg/kg	-	500 mak.	EN ISO 12937

şekilde ve uzun bir zaman aralığında kullanılması için belirli standartları sağlaması gerekir. Bu standartlar Amerika'da ASTM D6751 ve Avrupa'da EN 14214 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2'de Amerika ve Avrupa biyodizel standartları görülmektedir. Çizelgede görüleceği üzere Avrupa ve Amerika standartları arasında birkaç özellik haricinde pek fazla bir fark yoktur. Örneğin Amerika standartlarına göre biyodizelin setan sayısı en az 47 iken, Avrupa standartlarında en az 51'dir. Ayrıca, Avrupa standartlarında biyodizelin içerebileceği maksimum kükürt miktarı 10 ppm iken, Amerikan standartlarında bu değer 15 ve 500 ppm yani S15 ve S500 olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

Avrupa ve Amerika standartlarının yanı sıra birçok ülke de kendi biyodizel standartlarını oluşturmaktadırlar. Mesela, üretilen biyodizelin soğuk akış özellikleri çevre şartlarına göre değişmekte ve ülkeden ülkeye bölgesel farklılık gösterebilmektedir. Bu yüzden, bulutlanma noktası veya soğuk filtre tıkanma noktası gibi özellikler bölgeden bölgeye farklı belirlenmektedir.

3.1.4 Türkiye'deki atık bitkisel ve hayvansal yağ potansiyeli

Biyodizelin motorine oranla birçok üstünlüğü olmasına rağmen, hammaddesi bitkisel yağlar olması sebebiyle motorine göre maliyeti daha yüksektir. Bu nedenle, araştırmacılar maliyeti daha düşük olan hammaddelere yönelmişlerdir. Atık bitkisel ve atık hayvansal yağlar düşük maliyetli hammaddeler olarak göze çarpmaktadır. Lokantalar, yemek sanayi, restoranlar, hoteller, aşevleri, balık kızartan yerler ve hastanelerin mutfaklarından çıkan atık bitkisel yağlar genellikle lavaboya dökülmekte veya çevreye atılmaktadır. Kullanılmış yağlar çevreye döküldüğü zaman, drenaj sistemine sıvanmakta, kanalizasyon borusu içindeki atıkların yapışmasına sebep olmakta ve zamanla borunun tıkanmasına neden olmaktadır. Kanalizasyona dökülen atık yağlar miknatis gibi diğer atıkları da tutmakta ve kanalizasyon sistemi zamanla kullanılamaz hale gelmektedir. Ülkemizde oluşan atık bitkisel yağlar kanalizasyona dökülmek yerine biyodizel üretimi için geri kazanılabilirse, ülke ekonomisi için önemli bir kaynak sağlanacaktır. Bitkisel atık

yağların yönetimiyle ilgili esaslar Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından hazırlanan “Bitkisel Atık Yağların Kontrolü Yönetmeliği”

(<http://www.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/bitkiselatikyonetmeli.pdf>)

ile belirlenmiştir. Kullanılmış bitkisel yağların geri kazanılması ile evsel atık sular da daha az kirlenmiş olacaktır. Bu da atık su arıtma yöntemlerinde ortaya çıkabilecek işletme sorunlarını en aza indirerek maliyeti düşürecektir. Ayrıca, bu atıkların toplanması ile su kaynaklarının kirlenmesi ve toprağın bozulması da önlenecektir. Bu atıklar toplandıktan değerli bir hammadde haline dönüştürülerek, çevreye verilecek zarar en aza indirilebilir. Atık yemeklik yağların değerlendirilmesi hem çevre kirliliği açısından hem de ülke ekonomisine katma değer getirmesi açısından da oldukça önemli bir çalışma olacaktır.

Düşük maliyetli hammaddelerden birisi de tavuk yağıdır. Tavuk yağı, rendering tesislerinde tavuk artıklarının (kan, tüy, iç organlar, kafa) belirli işlemlerden geçirelerek ve işlenerek elde edilmektedir. Tavuk kesimhanelerinde tavuğun işlenmesi ve parçalara ayrılması esnasında ayrılan sindirim kanalı, et parçacıkları, ayak ve baş gibi kesim sonrası atıklar rendering tesislerinde kaynatılmaktadır. Bunun sonucunda elde edilen tavuk ununun preslenip sıkılmasıyla açığa çıkarılan yağa kanatlı rendering yağı veya tavuk yağı ismi verilmektedir. Ucuz bir yağ olan tavuk yağı biyodizel üretimi için uygun özelliklere sahiptir. Türkiye’de 2017 yılı için yaklaşık 97 milyon tavuk kesilmiştir (<http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24660>). Bir etlik pilicin ortalama 2,5 kg olduğu düşünülürse, toplam ağırlık yaklaşık 2,4 milyon ton olacaktır. Bir pilicin %25’inin renderinge girdiği düşünülürse, ortalama rendering miktarı yaklaşık 225 bin ton olarak ortaya çıkmaktadır. Bu 250 bin tonun %40 kadarı tavuk unu olarak elde edildiği ve tavuk ununun da %30 tavuk yağı içerdiği kabul edilirse yıllık üretilen tavuk yağı miktarı 72 bin ton olarak hesaplanabilmektedir. Elde edilen değerlere bakıldığında, tavuk yağlarının biyodizel üretiminde hammadde kaynağı olarak büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Türkiye’nin biyodizel üretim kapasitesinin yıllık bir milyon ton olduğu göz önüne alındığında tavuk yağından üretilen biyodizel miktarı yıllık üretiminin yaklaşık %10’unu karşılayabilecektir.

3.1.5 Türkiye’de biyodizel

Ülkemizde biyodizel kullanımının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel özel tüketim vergisidir. Bu vergi ile birlikte biyodizel motorinden daha pahalı hale gelmektedir. Ancak Türkiye’de şu an için biyoetanolün veya biyodizelin petrol kökenli yakıtlarla harmanlanan %2’lik kısmı özel tüketim vergisinden muaf tutulmaktadır. Ülkemizdeki motorin tüketiminin büyüklüğü göz önüne alındığında, motorine %2’lik biyodizel ilavesinin bile ekonomik açıdan büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bunun yanında, Enerji Piyasası Denetleme Kurulu tarafından değiştirilen tebliğ ile piyasaya akaryakıt olarak arz edilen motorin türlerinin, yerli tarım ürünlerinden üretilmiş yağ asidi metil esteri (biyodizel) içeriği 1 Ocak 2014’ten itibaren en az %1, 1 Ocak 2015’ten itibaren en az %2 ve 1 Ocak 2016’dan itibaren de en az %3 olacaktır. Yeni gelen düzenleme ile biyoyakıt kullanımının zorunlu hale gelmesi ile dışa bağımlılığın azalmasına büyük katkı sağlayacaktır.

Türkiye’de birçok firma hala biyodizel üretimi için lisans sahibi olmasına rağmen, biyodizel üretimi gerçekleştirememektedir. Bazı firmalar ise biyodizel üretiminde standartları yakalayamamaktadır. Yeterli saflıkta alkol kullanılmaması, yıkama esnasındaki sorunlar, kullanılan katalizörlerin kalitesi gibi alt yapı eksiklikleri üretilen biyodizelin kalitesini azaltmaktadır. Ayrıca tesis maliyetlerini azaltmak için kullanılan malzemenin biyodizel için uygun olmaması da üretilen biyodizelin kalitesini düşürmektedir.

4. MATARYEL VE YÖNTEM

4.1 Biyodizel Üretimi ve Karakterizasyonu

Bu kısımda laboratuvar şartlarında biyodizel üretim yöntemi ve üretim aşamasında kullanılan malzemeler ve kimyasallar hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca, üretilen biyodizelin yakıt özelliklerinin belirlenme yöntemlerinden bahsedilecektir.

4.1.1 Biodizel üretiminde kullanılan malzeme ve kimyasallar

4.1.1.1. Hassas Terazî

Biyodizel üretimi için çözelti hazırlama aşamasında kimyasal maddelerin tartılmasında, Şekil 4.1’de fotoğrafı görülen 0,01 g hassasiyetli OHAUS-PIONEER markalı 10°C ila 40°C arasında yoğunlaşmayan hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Hassas terazi.

4.1.1.2. Manyetik Karıştırıcılı, Sıcaklık Kontrollü Isıtıcı (Hot-plate)

Biyodizel üretimi için çözelti hazırlama aşamasında çözeltileri ısıtmak ve sıcaklıklarını belirli değerde sabit tutmak için Şekil 4.2’de fotoğrafı görülen HEIDOLPH marka, MR Hei-Tec model ısıtıcılı manyetik karıştırıcılı, % ± 2 hız hassasiyetli, 30-1400 d/d hız aralığında çalışabilen, sıcaklık kontrollü ısıtıcı kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Manyetik karıştırıcılı, sıcaklık kontrollü ısıtıcı.

Cam malzemeler

Biyodizel üretim aşamasında, laboratuvarında teflon musluklu ayırma hunisi, balon jojeler, beherler, borucamlar, mezürler gibi malzemeler kullanılmıştır.

4.1.1.3. Kimyasal Malzemeler

Biyodizel üretim aşamasında alkol olarak metil alkol (CH_3OH , Merck, %99,9 saflık), katalizör olarak sülfürik asit (H_2SO_4 , SIGMA-ALDRICH, % 95-97 saflık), toluen ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$), fenolftalein (CARLO ERBA), 2-Propanol (SIGMA-ALDRICH), Potasyum hidroksit (KOH) ve yıkama suyu olarak damıtılmış saf su kullanılmıştır.

4.1.2 Biyodizel Üretiminde Hammadde Olarak Kullanılan Hindi Rendering Yağı ve Özellikleri

Biodizel üretiminde hammadde olarak kullanılan hindi rendering yağı, Bolu’da bulunan Bolca Hindi firmasına ait hindi kesimhanesi rendering tesislerinden alınmıştır. Alınan hindi rendering yağı, içerisindeki mevcut olabilecek suyun uzaklaştırılması için 110°C’de bir saat boyunca ısıtılmış ve içerisinde herhangi bir çözünmeyen madde (et veya kemik parçaları gibi) kalmaması için filtre edilmiştir. Rendering tesislerinden elde edilen hayvansal yağların serbest yağ asit değeri genellikle %5 ile %25 arasındadır (Canakci, 2001). Yağın içerdiği yüksek miktardaki SYA, transesterifikasyon reaksiyonunda baz katalizör kullanılması durumunda sabunlaşmaya neden olabilmektedir. Araştırmacılar transesterifikasyon işleminde baz katalizör kullanabilmek için, biyodizel üretilecek hammaddenin SYA değerinin %1’in altında olmasını önermektedirler (Freedman, 1984).

Hindi rendering yağı filtre edildikten sonra viskozite, yoğunluk ve asit değeri gibi başlıca özellikleri ölçülmüştür. Ölçülen yağ özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Yapılan deneylerde kullanılan hindi yağının asit değerinin 8,24 mg KOH/g olduğu tespit edilmiştir. Bu da yaklaşık olarak %4,12 SYA seviyesine karşılık gelmektedir. Hindi rendering yağının yağ asidi dağılımı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi, hindi yağının büyük kısmını palmitik, oleik ve linoleik yağ asidi oluşturmaktadır.

Çizelge 4.1. Hindi rendering yağının özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	kg/m ³	923
Kinematik viskozite	mm ² /s	32,3
Asit değeri	mgKOH/g	8,24

Çizelge 4.2. Hindi rendering yağının yağ asidi bileşenleri

Yağ asitleri	İsimler	Bileşenler (%)
C14:0	Miristik	0,50
C16:0	Palmitik	17,91
C18:0	Stearik	6,12
C18:1n9t	Elaidik	0,63
C18:1n9c	Oleik	29,50
C18:2n6t	Linolelaidik	0,03
C18:2n6c	Linoleik	41,77
C18:3	Linolenik	3,17
C20:0	Araşidik	0,15
C21:0	Henikosanoik	0,07
C22:0	Behenik	0,15

4.1.3 Biyodizel Üretim Yöntemi

Yapılan bu çalışmada kullanılan hindi yağının SYA değerinin %1'den fazla olması nedeniyle ön iyileştirme reaksiyonuna gereksinim duyulmuştur. Ön iyileştirme reaksiyonunun amacı yağın SYA değerini %1'in altına indirmektir. Ön iyileştirme işleminden sonra, transesterifikasyon reaksiyonunda farklı baz katalizörler kullanılarak biyodizel üretim reaksiyonları tamamlanmıştır.

4.1.3.1. Ön İyileştirme

Ön iyileştirme reaksiyonlarında asit katalizör olarak sülfürik asit (H_2SO_4), alkol olarak ise metanol (CH_3OH) kullanılmıştır. Katalizör miktarı ve alkol molar oranı yağın SYA içeriğine göre hesaplanmıştır. Ön iyileştirme reaksiyonunda farklı katalizör miktarı, alkol molar oranı ve reaksiyon zamanı kullanılarak bu parametrelerin SYA üzerine etkileri incelenmiştir. Reaksiyonlarda kullanılan katalizör ve alkol miktarları, reaksiyonda kullanılan katalizöre göre farklılık göstermiştir. Bu nedenle, reaksiyonlarda kullanılan miktarlar ilerideki kısımlarda detaylı olarak verilmektedir. Reaksiyon sıcaklığı ve devri olarak $63^\circ C$ ve 600 d/d seçilmiş ve hesaplamalar için hindi yağındaki yağ asitlerinin molekül ağırlıklarının ortalaması alınmıştır.

Yapılan deneyler laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Belirli miktarda hindi yağı reaksiyon kabına konulmuş ve 63°C'ye kadar ısıtılmıştır. Daha sonra, önceden hazırlanmış alkol-katalizör karışımı reaksiyon kabına eklenmiş ve belirlenen zaman süresince reaksiyon devam ettirilmiştir. Reaksiyon sonunda karışım ayrışma kabına konulmuş yaklaşık bir gün boyunca bekletilmiştir. Alkol-su ve katalizör karışımı ayrıştırıldıktan sonra ön iyileştirilmiş hindi yağı içindeki muhtemel artık su ve alkolün buharlaştırılması için yağ-ester karışımı 110°C'de bir saat boyunca kaynatılmıştır. Daha sonra yağ-ester karışımının asit değeri ölçülmüş ve kaydedilmiştir.



Şekil 4.3. Metil alkol ve asidin karıştırılması.

4.1.3.2. Transesterifikasyon

Alkol-yağ molar oranı, hindi yağının içindeki ön iyileştirilmemiş miktara göre hesaplanmış ve 6:1 seçilmiştir. Katalizör miktarı KOH ve NaOH katalizörleri için yine ön iyileştirilmiş yağın içerisindeki reaksiyona girmeyen ilk yağ miktarının %1'i olarak seçilmiş ve buna da ilgili referanstan (Van Gerpen, 2004) alınan nötralizasyon miktarı eklenerek katalizör miktarı hesaplanmıştır. Katalizör ve alkol miktarı aşağıdaki örnekteki gibi belirlenmiştir.

Serbest yağ asidi %10 olan bir yağ için 100 g yağ alındığı durumda ve serbest yağ asidi değerinin %0,5'e düşürüldüğü kabul edilirse, ön iyileştirilmiş yağın yaklaşık 90 gramı reaksiyona girmeyen yağ olarak dikkate alınır ve transesterifikasyondaki katalizör ve alkol miktarları bu değere göre aşağıdaki şekilde hesaplanır:

Bir mol yağın molekül ağırlığının 850 g olduğu kabul edildiğinde, yağın mol miktarı şu şekilde belirlenir:

Yağın mol miktarı = $90 / 850 = 0,1059$ mol olur.

Örnek olarak %1 baz katalizör ve 6:1 metanol kullanıldığı düşünülürse:

Baz katalizör miktarı = $90 \times 0,01 = 0,9$ g olur.

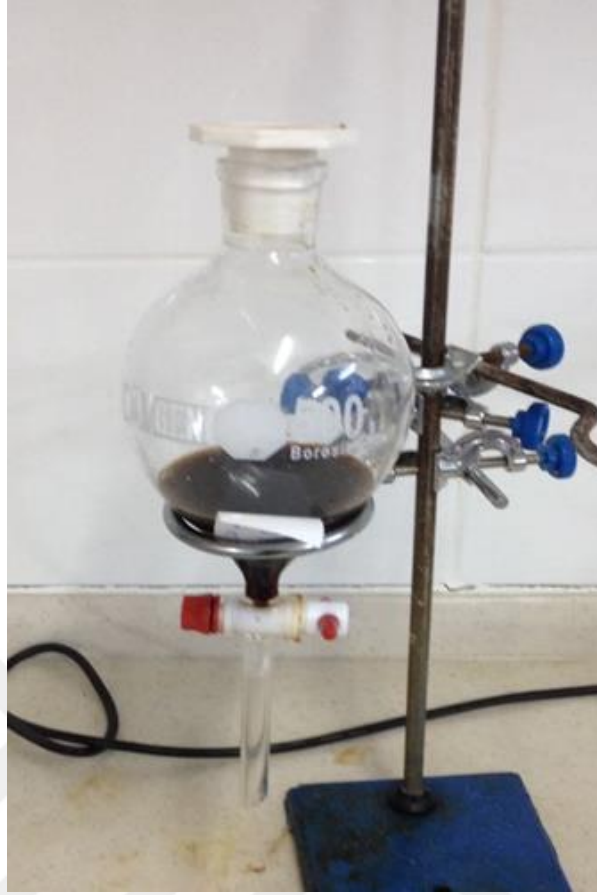
Metanol miktarı = $0,1059 \times 6 \times 32,04$ (metanolün mol ağırlığı) = 20,36 g olarak hesaplanır.

Katalizör miktarına, nötralizasyon miktarı eklenerek toplam katalizör miktarı belirlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu için takip edilen işlem, kullanılan katalizör dışında ön iyileştirme reaksiyonundaki işlem ile aynıdır.

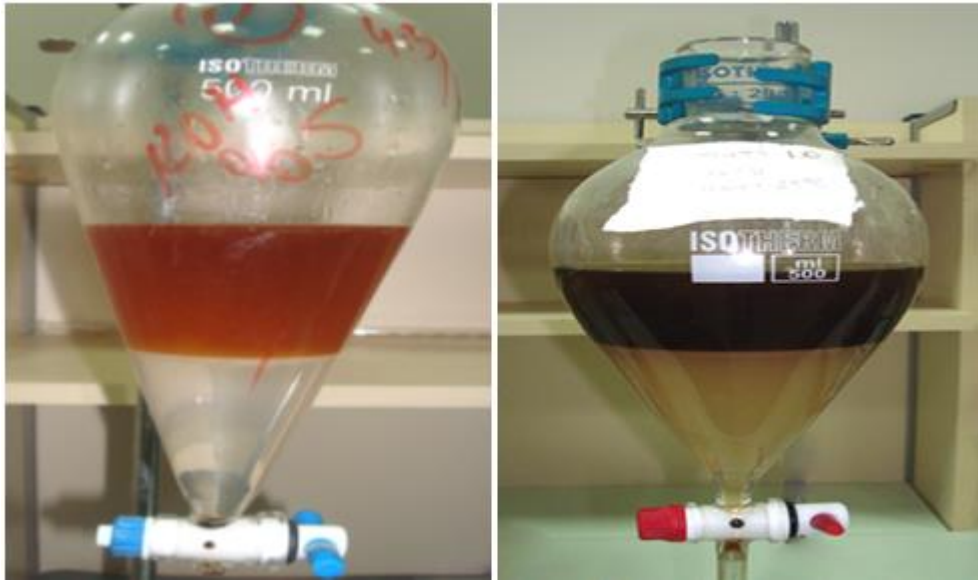


Şekil 4.4. Transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilmesi.

Bu çalışmada transesterifikasyon reaksiyonları için reaksiyon sıcaklıkları 40°C ve 63°C seçilirken, reaksiyon devri 600 d/d, reaksiyon süresi ise 1, 2 ve 4 saat olarak seçilmiştir. Reaksiyon süresi sona erdiğinde, karışım reaksiyon kabından alınıp dinlenme kabında beklemiştir. Karışım, ayrışma işleminin tam olabilmesi için bekletme kabında yaklaşık olarak 24 saat boyunca bekletilmiştir (Şekil 4.5). Daha sonra, altta kalan tabaka esterden ayrıştırılmıştır. Şekil 4.6’de gösterildiği gibi, kalan ester saf su ile yıkanmış, yıkama işleminden sonra esterin içindeki fazla alkol ve suyun alınabilmesi için 110°C’de bir saat boyunca kurutma işlemi uygulanmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen ester filtrelenmiş ve yakıt özellikleri belirlenmek üzere buzdolabında saklanmıştır.



Şekil 4.5. Transesterifikasyon reaksiyonu sonrası faz ayrışımı.



Şekil 4.6. Transesterifikasyon reaksiyonu sonrası yıkama işlemi.

4.1.4. Üretilen biyodizelin yakıt özelliklerinin belirlenmesi

Transesterifikasyon parametrelerinin yakıt özelliklerine etkisinin incelenebilmesi için üretilen biyodizellerin uluslararası biyodizel standartlarında bulunan yakıt özellikleri belirlenmiştir. Yakıt analizleri, Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Enerji Tarımı Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır.

Biyodizel üretiminde kullanılan hammaddenin içeriğini gösteren en temel özelliklerinden bir tanesi yağ asidi dağılımlarıdır. Kullanılan yağların ve üretilen biyodizellerin yağ asidi dağılımları IUPAC 2.301 standart test metoduna göre belirlenmiştir. Biyodizelin üretim maliyetini doğrudan etkileyen ve belirlenmesi gereken en önemli etkenlerden biri ester eldesidir. Bu çalışma için ester eldesi, transesterifikasyon sonucu elde edilen ester miktarının, transesterifikasyon reaksiyonu için kullanılmış ön iyileştirilmiş hindi yağının miktarına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

Transesterifikasyon reaksiyonundan sonra elde edilen esterde, monogliseric, digliseric ve trigliseric gibi yağın reaksiyona girmeden önce içerdiği bazı bileşikler bulunabilmektedir. Ayrıca, transesterifikasyon reaksiyonu aşamalı bir reaksiyon olduğu için, trigliseric parçalanarak ara ürün olan digliseric ve monogliseric dönüşmektedir (Knothe, 2006). Bunun yanında, transesterifikasyon sonrası ester ve gliserinin tam olarak ayrıştırılamamasından dolayı ve az yıkamadan dolayı da ester içinde gliserin kalabilmektedir. Toplam gliserin, serbest ve bileşik gliserinin toplamıdır. Serbest gliserin biyodizel üretim işleminde gliserin kısmının yetersiz ayrıştırılması sonucu kalan gliserindir. Aynı zamanda, kalan gliserinin uzun zamanlı bekletilmesi durumunda oluşan hidroliz sonucunda da serbest gliserin oluşmaktadır. Bileşik gliserin ise reaksiyon sonrası esterde kalan monogliseric, digliseric ve triglisericlerin toplamına eşittir (Van Gerpen J. H.2005). Toplam ve serbest gliserin transesterifikasyon reaksiyonunun tamlığını gösteren ve yakıtın ticari uygulamalar için hazır olup olmadığını belirlemek için bilinmesi gereken en önemli yakıt özellikleridir. Bu değerlerin yüksek olması motorun çalışmasını olumsuz yönde etkileyecektir (Çetinkaya, 2004). Monogliseric, digliseric ve trigliseric değerleri için EN 14214 biyodizel standartlarında belirli bir sınır değer varken (sırasıyla %0,8,

%0,2 ve %0,2), ASTM D6751 biyodizel standardında böyle bir sınır değeri yoktur. Mono-di-tri gliserit, toplam-serbest gliserin ölçümleri EN 14105 standart test metoduna göre yapılmıştır. Monogliserit, digliserit, trigliserit, toplam ve serbest gliserin gibi yakıt özelliklerinin yanında biyodizelin ester içeriği özelliği yakıtın saflığı hakkında bilgi veren ve EN 14214 biyodizel standartlarında bulunan bir özelliktir. Ester içeriği değerleri EN 14103 standart test metoduna göre ölçülmüştür.

Yoğunluk motor performansını doğrudan etkileyen önemli bir yakıt özelliğidir. Yakıt atomizasyonu, setan sayısı ve ısı değeri gibi birçok performans karakteristiği yoğunluk ile ilişkilidir (Ryan, 1984). Yakıt enjeksiyon sistemleri yakıtı hacimsel olarak ölçmektedir. Bu nedenle, yakıtın yoğunluğunun değişmesi, farklı kütlede yakıt enjekte edilmesine neden olacak ve bu da dolayısıyla motor çıkış gücünü etkileyecektir (Bahadur, 1995). Biyodizelin yoğunluğu genel olarak 860 ile 900 kg/m³ arasında değişmektedir. Birçok çalışmada, biyodizelin yoğunluğunun pek değişmediği görülmüştür. Bu sonucun, kullanılan metanol ve yağın yoğunluklarının, oluşan esterin yoğunluğuyla birbirine çok yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yoğunluk değerleri 15°C’de ve ASTM D4052 standart test metoduna göre belirlenmiştir.

Başta viskozite olmak üzere, bazı fiziksel yakıt özellikleri biyodizelin dizel motorlarında kullanılmasını sınırlamaktadır. Viskozite atomizasyon kalitesini, yakıt damlacık çapını ve penetrasyonunu dolayısıyla yanma kalitesini etkilemektedir (Tate, 2006). Yüksek viskozite zayıf yakıt atomizasyonuna, eksik yanmaya, yakıt enjektörlerinin tıkanmasına, sekman karbonlaşmasına ve yakıtın motor yağı ile karışmasına sebep olmakta, düşük viskozite ise yakıt sisteminde kaçaklara neden olmaktadır. Ayrıca yüksek viskozite, yakıtı pompalamak için gerekli olan enerjiyi arttırmakta ve yakıt pompası elemanlarının aşınmasına sebep olmaktadır (Schwab, 1987). Bitkisel ve hayvansal yağların viskoziteleri motorine kıyasla oldukça yüksektir. Zaten transesterifikasyon reaksiyonunun esas amaçlarından biri yağların viskozitelerini standart değerlere azaltabilmektir. Viskozite ölçümleri 40°C’de ve ASTM D445 standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

Transesterifikasyon reaksiyonunda stokiyometrik alkol-yağ molar oranı 3:1'dir. Ancak stokiyometrik oranın artırılmasıyla birlikte daha yüksek ürün eldeleri sağlanabilmektedir. Kullanılan fazla alkol biyodizel üretim işleminde biyodizelden uzaklaştırılmalıdır. Çünkü biyodizel içeriğinde kalan alkol, biyodizelin parlama noktasını düşürmektedir. Ayrıca biyodizel içeriğindeki artık alkol, yakıt pompasını, pompa elemanlarını ve contaları etkileyecek, bu da özellikle alüminyum üzerinde metal korozyonuna neden olacaktır (Felizardo, 2006). Metanol içeriği ölçümleri EN 14110 standart test metoduna göre yapılmıştır.

Biyodizelin petrol kökenli dizel yakıtına kıyasla en üstün özelliklerinden birisi de parlama noktasının oldukça yüksek olmasıdır. Parlama noktası genelde yakıtın depolanması ve güvenliği ile ilgili olmakla birlikte motor performansı üzerinde etkin bir değişiklik meydana getirmemektedir. Ayrıca parlama noktasındaki değişimler yanma karakteristiklerini de pek fazla etkilememektedir (Caro, 2001). Biyodizelin parlama noktası Avrupa ve Amerika standartlarına göre sırasıyla 101°C ve 130°C olmalıdır. Motorinin EN 590 standartlarına göre parlama noktası ise minimum 55°C'dir. Bu da güvenlik açısından biyodizeli motorine kıyasla çok daha güvenli hale getirmektedir. Parlama noktası değerleri ASTM D93 standart test metoduna göre belirlenmiştir.

Yakıtın akma noktası veya soğuk filtre tıkanma noktası, belirlenmesi gereken önemli yakıt özelliklerindendir. Çünkü bu özellikler, yakıtın soğuk iklim şartlarında kullanılabilirliğini doğrudan etkileyecektir. Akma noktası ve soğuk filtre tıkanma noktası uluslararası biyodizel standartlarında coğrafi konuma ve mevsime göre farklılık göstermektedir. Bir bitkisel veya hayvansal yağın doymuşluk derecesini belirleyebilmek için belirlenen diğer bir özellik de iyot sayısıdır. İyot sayısı, ASTM D6751 standartlarında bulunmaz iken, EN 14214 standartlarında maksimum 120 olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Akma noktası, soğuk filtre tıkanma noktası ve iyot sayısı ölçümleri sırasıyla ASTM D97, ASTM D6371 ve EN 14111 standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

Asit değeri yakıtın içinde bulunan asit miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu özellik hem yakıtın ömrü hakkında bilgi vermekte hem de yakıt

kalitesinin bir göstergesi olmaktadır. Biyodizelin asit değeri, hem Avrupa hem de Amerika biyodizel standartlarında 0,5 mgKOH/g olarak belirlenmiştir. Eğer üretilen biyodizellerin asit değerleri bu standart değerlerin üstünde olursa, bu durum yakıt isteminde tortulara neden olacak, böylelikle yakıt pompası ve yakıt filtresinin ömrünü azaltacaktır (Tyson, 2001). Asit değeri ölçümleri AOCS Cd-3a-64 standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

Bir yakıtın bakır şerit korozyon özelliği, o yakıtın bakır malzemede neden olduğu korozyonun derecesini ölçmek için belirlenmektedir. Diğer taraftan, bu özellik yakıtın içinde kalan asit miktarının da bir göstergesidir. Yani yakıtın içerdiği yüksek miktarlardaki SYA veya asit içeriği bu test için standart dışı değerlere neden olacaktır (Kinast, 2001). Bunun yanında ASTM D130 standart test metodunda, yakıt bünyesindeki sülfür içeriğinin de bazı metaller üzerinde koroziv etkisi olabileceğini belirtilmektedir. Bakır şerit korozyon özelliği EN 14214 ve ASTM D6751 standartlarında farklı limitlerde verilmiştir. EN 14214 standardında minimum No 1 iken, ASTM D6751 standardında bu değer No 3'tür. Bakır şerit korozyon değerleri ASTM D130 standart test metoduna göre ölçülmüştür.

Isıl değer, bir yakıttan elde edilebilecek enerji miktarının ölçümüdür. Yakıtın ısı değeri doğrudan yakıt tüketimine etki etmektedir. Biyodizelin ısı değeri motorine kıyasla biraz daha düşüktür. Biyodizelin ısı değeri, sahip olduğu kimyasal yapıya göre değişiklik göstermektedir. Zincir uzunluğunun ve doymuşluğun artmasıyla ısı değeri artmaktadır (Graboski, 1998). Isıl değer EN 14214 ya da ASTM D6751 biyodizel standartlarında belirtilmemiştir. Ancak motorin ile yakıt tüketiminin karşılaştırılması için kullanılmaktadır. Bunun yanında bu standartlarda belirtilmemesine rağmen, ısıtma amaçlı yakıtlar için kullanılan EN 14213 standardında 35000 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Isıl değer ölçümleri ASTM D240 standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

Bir yakıtın karbon depoziti oluşturma eğilimini belirleyebilmek için, o yakıtta karbon kalıntısı testi yapılmaktadır. Bu test, yakıtın motorda kullanılması sonucu oluşacak karbonun tam olarak göstergesi olmasa da, tahmini bir yaklaşım olarak düşünülebilmektedir. Karbon kalıntısı değeri ölçümleri ASTM D4530 standart test

metoduna göre yapılmıştır. Yakıtın içinde mevcut olabilecek su, metal parçalarda korozyon oluşturabilmektedir. Bu nedenle motorlarda kullanılacak yakıtın su içeriğinin de bilinmesi gereklidir. Su içeriği değerleri EN ISO 12937 standart test metoduna göre ölçülmüştür.

Biyodizelin oksitlenme stabilitesi, motorine kıyasla daha kötüdür. Bu nedenle biyodizel motorin ile karşılaştırıldığında, çok daha çabuk yaşlanmaktadır. Bu çalışmada, oksitlenme stabilitesi değerleri PetroOXY (Rapid Small Scale Oxidation Test, RSSOT) cihazı ile ASTM D7545 standartlarına göre ölçülmüştür. Bu metot ASTM tarafından onaylanmasına rağmen, birim olarak ASTM D6751 biyodizel standartlarında yer almamıştır.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtların kükürt içeriği, motorda aşınmalara veya depozit oluşumlarına neden olabilmektedir. Bunun yanında, yakıtların içindeki kükürt çevre ve insan sağlığı açısından oldukça önemlidir. Çünkü içten yanmalı motorlarda kullanılması ile birlikte insan sağlığına zararlı egzoz emisyonlarına neden olmaktadır. Kükürt içeriği EN 14214 biyodizel standartlarında maksimum 10 ppm olarak belirlenmişken, ASTM D6751 biyodizel standartlarında S15 (maksimum 15ppm) ve S500 (maksimum 500 ppm) olmak üzere iki farklı şekilde sınırlandırılmıştır. He ve arkadaşları, biyodizel üretiminde kullanılan atık hayvansal veya bitkisel yağların protein gibi kükürt içeren bazı bileşikler içermesinden dolayı, bu yağların kükürt içeriğinin yüksek olabileceğini belirtmiştir (He, 2009). Bunun yanında, biyodizelin rafine aşamasında su ile yıkama işlemi yapılırken kükürdün ayrıştırılması çok önemli önemlidir. Özellikle de ön iyileştirme uygulanan reaksiyonlarda, kükürdün ayrıştırılması daha da önemli hale gelmektedir. Ancak bu araştırmacılar yapmış oldukları çalışmada, sülfürik asit kullanılarak yapılan ön iyileştirme ile ön iyileştirilmiş yağın içerisine karışan kükürdün önemli miktarda olmadığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan kükürt ölçüm cihazının maksimum ölçebildiği değer 990 ppm olarak sınırlandırılmıştır. Biyodizel üretiminde kullanılan deri yağının ve ön iyileştirilmiş deri yağının kükürt içeriği 990 ppm'den daha yüksek olarak belirlenmiştir. Cihazının maksimum ölçüm değeri nedeniyle, ön iyileştirme reaksiyonunun kükürt içeriği üzerine etkisi

incelenememiştir. Kükürt içeriği ölçümleri ASTM D2622 standart test metoduna göre yapılmıştır.

4.2. Motor Performans, Egzoz Emisyon ve Yanma Karakterizasyon Testleri

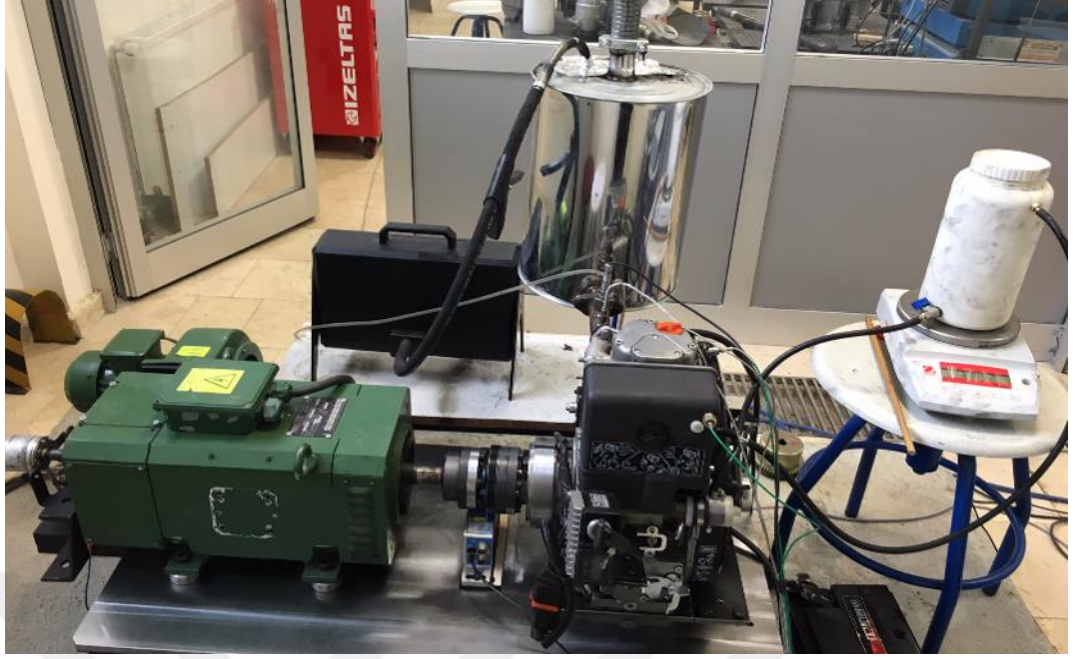
Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Otomotiv Laboratuvarında, üretilen biyodizel yakıt, petrol kökenli dizel yakıt ile karıştırılarak tek silindirli bir dizel motorda test edilmiş, motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristikleri belirlenmiştir.

4.2.1 Yakıt karışımlarının hazırlanması

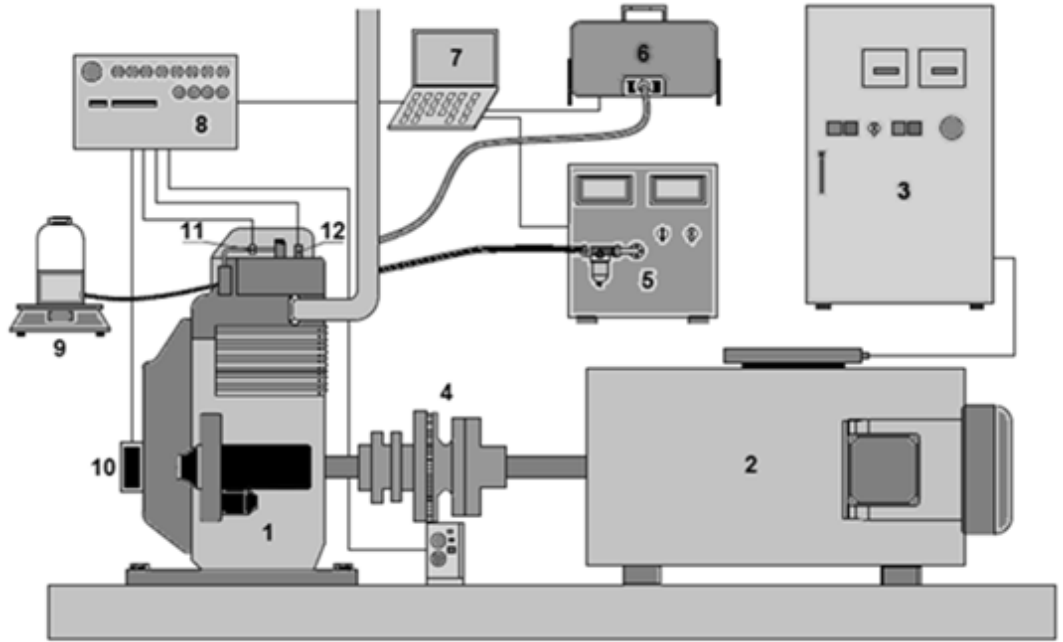
Elde edilen hindi rendering yağı biyodizeli (HRYB), referans yakıt olarak ta kullanılan petrol kökenli ticari dizel yakıtı (B0) ile hacimsel olarak %10, %20 ve %50 oranlarında karıştırılarak sırasıyla B10, B20 ve B50 yakıt karışımları elde edilmiştir.

4.2.2 Motor Testleri

Elde edilen biyodizelin yanma karakteristikleri ve notor performans ve egzoz emisyon değerlerinin belirlenebilmesi için Şekil 4.7’de fotoğrafı ve Şekil 4.8’de şematik resmi görülen motor test düzeneği kullanılmıştır. Yakıt karışımlarının motor testleri, tam yük altında 2000, 2500 ve 3000 d/d’da eşit şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Silindir basıncı ve yakıt hat basıncı, 0,1 derece krank açısında kaydedilmiştir. Tüm veriler, Kistler KiBox veri toplama sistemi kullanılarak elde edilmiştir. Her testten önce yakıt hattında bir önceki testten artık yakıt kalmadığından emin olunduktan sonra yeni teste başlanmıştır. Bütün deneylerden önce motor 5 dakika çalıştırıldı ve stabil veri çıkışı elde edilmeye başlandıktan sonra ölçümlere geçildi. KiBox’tan alınan tüm verilerin 100 çevrim ortalaması alınarak kullanıldı.



Şekil 4.7. Motor test sisteminin fotoğrafı.

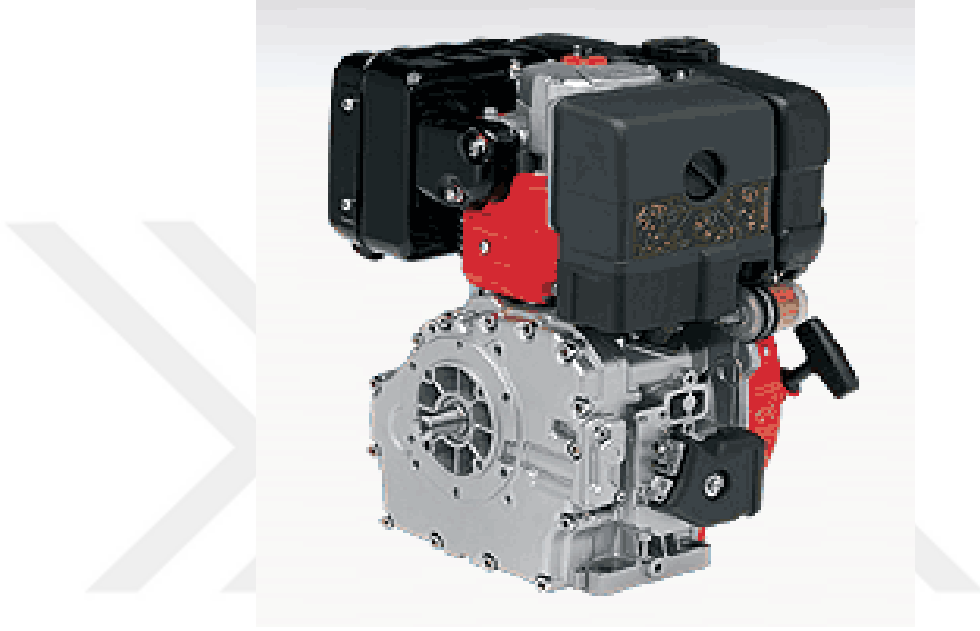


- | | | | |
|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1. Deney motoru | 4. Torkmetre | 7. Bilgisayar | 10. Enkoder |
| 2. Dinamometre | 5. Emisyon cihazı | 8. Veri toplama kartı | 11. Yakıt hat basınç sensörü |
| 3. Kontrol paneli | 6. Is ölçer | 9. Hassas terazi | 12. Silindir basınç sensörü |

Şekil 4.8. Motor test sisteminin şematik görünümü.

4.2.2.1 Test Motoru

Deneylerde, Şekil 4.9’da fotoğrafı görülen Lombardini marka, 15 LD 350 model, doğal emişli, dört zamanlı, tek silindirli, hava soğutmalı, direk enjeksiyonlu bir dizel motoru kullanılmıştır. Testlerde kullanılan dizel motorunun fabrika çıkış teknik özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.9. Test motoru.

Çizelge 4.3. Testlerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri

Model	Lombardini 15 LD 350
Maksimum güç	5,5 kW/3600 d/d
Maksimum tork	16,6 Nm/2400 d/d
Çap × kurs	82 mm × 66 mm
Silindir hacmi	349 cm ³
Sıkıştırma oranı	20.3/1
Enjeksiyon pompa tipi	QLC tipi
Enjektör memesi	0.22 x 4 delik x 160°
Enjektör iğnesi kalkma basıncı	207 bar
Yakıt püskürtme avansı (°KMA)	20° ÜÖNÖ
Emme supabı açık/kapalı (°KMA)	10° ÜÖNÖ / 42° AÖNS

4.2.2.2 Dinamometre

Deneylerde KEMSAN marka. 15 kW güce sahip eddy-current dinamometresi kullanılmıştır. Frenleme özelliği elektriksel indüksiyon işlemi ile sağlanır.

4.2.2.3 Tork Ölçüm Ünitesi

Tork, kuvvet momenti veya dönme momentidir. Bir kuvvetin nesnenin ekseninde dönme eğilimidir. Uygulanan kuvvet itme veya çekme olabilir. Deneylerde 20 Nm ve 200 Nm olarak ölçüm sınırları değiştirilebilen, flanşla motor mili üzerine monte edilebilen, rotor ve statörden oluşan Şekil 4.10 da resmi görülen Kistler marka, 4550 A model tork ölçüm ünitesi kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Tork ölçüm ünitesi.

4.2.2.4 Egzoz Emizyon Analiz Cihazı ve İis Ölçer

Deneylerde, egzoz gaz emisyonlarını ve is emisyonlarını ölçmek için, Şekil 4.11’de fotoğrafı ve Çizelge 4.4’te özellikleri görülen Mobydick marka 5000 Kombi model egzoz gazı analizörü ile Mobydick marka is ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Egzoz gaz emisyon cihazı.

Çizelge 4.4. Egzoz gaz analiz cihazı ve is ölçerin özellikleri

	Aralık	Doğruluk
NO _x (ppm)	0~5000	1
CO (%v/v)	0~10	0,01
İis emisyonu (%)	0-100	0,1

4.2.2.5. Silindir Basınç Sensörü

Silindir basıncını ölçmek için Şekil 4.12’de resmi görülen Kistler marka A3 6052C model piezoelektrik basınç sensörü ve 5064 şarj amplifikatörü kullanıldı.



Şekil 4.12. Silindir basınç sensörü ve amplifikatör.

4.2.2.6. Yakıt Hattı Basınç Sensörü

Yakıt hat basıncını ölçmek için bir Kistler 4065B piezoresistiv sensör ve bir 4665 yükseltici kullanıldı.



Şekil 4.13. Yakıt hattı basınç sensörü ve yükseltici.

4.2.2.7. Enkoder

Krank açısını, üst ölü noktayı ve motor devrini belirlemek için kullanılan cihaza enkoder denir. Şekil 4.14'te resmi görülen Kistler marka 2614B model enkoder krank miline bağlandı ve ölçümler yapıldı.



Şekil 4.14. Enkoder.

4.2.2.8. Veri Toplama Sistemi (Kistler KiBox)

Silindir basıncı ve yakıt hattı basınç verileri 0,1 derece krank açısı ile kaydedildi. Tüm sinyaller, Şekil 4.15'te resmi görülen Kistler KiBox veri toplama sistemi kullanılarak işlendi ve kaydedildi.



Şekil 4.15. Veri toplama cihazı (Kistler KiBox).

4.2.2.9. Bilgisayar

Cihazların birbirleriyle koordineli bir şekilde çalışmasını sağlamak ve kontrol etmek amacıyla HP marka bilgisayar kullanılmıştır.

4.2.3 Elde Edilen ve Hesaplanan Performans Parametreleri

Biyodizel karışımlarının dizel motorda performans, yanma ve emisyon karakteristiklerini belirleyebilmek için testlerde elde edilen veriler ile efektif güç, özgül yakıt tüketimi (ÖYT), efektif verim, sıcaklık değişimleri, silindir basıncı, ısı salınımı verileri hesaplanmış ve grafikler haline getirilmiştir. Bunun için aşağıdaki başlıklarda verilen yöntem ve formüller kullanılmıştır.

4.2.3.1. Motor Momentinin Hesaplanması

Moment ya da diğer adıyla tork, motor devriyle birlikte bir motorun iş yapabilme kabiliyetini belirleyen bir parametredir. Motor momenti, motorun krank miline uygulanan döndürme momenti olarak tanımlanmaktadır.

$$M_d = F \times l \quad (4.1)$$

4.2.3.2. Efektif Gücün Hesaplanması

Efektif güç motor volanından alınan faydalı güçtür. Motor momenti ve açısal hıza bağlı olarak değişmektedir. Efektif güç aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$P_e = \omega \times M_d \quad (4.2)$$

Motor devri (n), (d/d) biriminden olduğu için açısal hız şu şekildedir;

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times n}{60} = \frac{\pi \times n}{30} \left(\frac{1}{s}\right) \quad (4.3)$$

Açısal hız, Denklem (4.2)'de yerine koyulur ve birim kW olarak hesaplanırsa;

$$p_e = \frac{\pi \times n}{30} \times M_d \times 10^{-3} \quad (4.4)$$

$$p_e = \frac{n \times M_d}{9549,58} \text{ (kW)} \quad (4.5)$$

olarak elde edilir.

Burada;

Pe: Efektif güç (kW)

ω : Açısal hız (rad/s)

n: Motor devri (d/d) olarak ifade edilmektedir.

4.2.3.3 Isıl Verimin Hesaplanması

İçten yanmalı motorlarda bir çevrimde motora sürülen yakıtın bir kısmı yanmamakta ve egzoz yoluyla atılmaktadır. Isıl verim, motordan alınan faydalı gücün motorasürülen enerji miktarına oranı olarak ifade edilmektedir. Buna göre ısı verim aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$n_t = \frac{P_e}{Q_e} \quad (4.6)$$

Bu formülde Q_g , motora sürülen enerji miktarıdır. Denklem (4.6) birim zaman için yazılacak olursa ve yakıtın alt ısı değeri (H_u) dikkate alınır aşağıdaki formül elde edilmektedir;

$$n_t = \frac{P_e}{Q_e} = \frac{P_e}{m_y \times H_u} \quad (4.7)$$

4.2.3.4 Özgül Yakıt Tüketiminin Hesaplanması

Özgül yakıt tüketimi, motorun birim güç için harcadığı yakıt miktarı olarak tanımlanmaktadır. Motor testlerinde yakıt deposu dijital terazinin üzerine konulmuş ve test esnasındaki yakıt tüketimi dijital teraziden gram olarak kaydedilmiştir. Özgül yakıt tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$be = \frac{m_y}{P_e} \times 3600 \quad (4.8)$$

Bu formülde;

be = Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)

m_y = Yakıt tüketimi (g/s)

P_e = Efektif güç (kW)

olarak ifade edilir.

4.2.3.5. Isı Salınım Oranının Hesaplanması

Krank açısına bağlı olarak silindir basıncını elde etmek silindirdeki yanma hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Heywood, 1988). Dizel motorlarda silindir basınç verileri kullanılarak ısı salınımı analizi yapılabilmektedir. Böylelikle aynı şartlarda farklı yakıtların performansları karşılaştırılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, silindir basınç verileri kullanılarak ısı salınımı analizi yapılmış ve ısı salınımı verileri kullanılarak tutuşma gecikmesi ve yanma karakteristikleri hesaplanmıştır.

Tutuşma gecikmesinin hesaplanabilmesi için yakıt hattı basınç eğrilerinden enjektörün açılma zamanı belirlenmiştir. Isı salınımı sonuçlarına bakılarak da yanma başlangıcı tespit edilmiştir. Yanma başlangıcı, ısı salınım eğrisindeki yükselmenin başladığı nokta olarak kabul edilmiştir. Belirlenen bu iki nokta arası da krank açısı cinsinden tutuşma gecikmesi olarak tespit edilmiştir. Enjektör açılma basıncı değeri kullanılarak enjeksiyon başlangıcı belirlenmiştir.

Isı salınımı analizi termodinamiğin birinci kanunundan yararlanılarak hacmi bilinen bir silindirden alınan basınç verileriyle analiz edilebilmektedir. Isı salınım analizinde bazı kabuller yapılmıştır. Silindir içinde yanma esnasında termodinamik dengenin olduğu kabul edilmiş, ani sıcaklık değişimleri ve basınç dalgalanmaları göz ardı edilmiş, dengede olmayan şartlar (yakıtın buharlaşması, karışım oluşumu vb. durumlar) ihmal edilmiştir.

Termodinamiğin I. Kanununa göre:

$$\frac{dU}{dt} = Q_t - W \quad (4.7)$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_t}{dt} - \frac{dQ_d}{dt} = P \frac{dV}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (4.8)$$

denklemini yazılır. Bu denklemde U sistemdeki iç enerjiyi ifade etmektedir. Net ısı salınımı (Q_n), toplam ısı salınımı (Q_t) ile silindir duvarlarına olan ısı transferi (Q_d) arasındaki farktır ve piston üzerine yapılan iş ile iç enerji değişiminin toplamına eşittir.

İç enerji değişimi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{dU}{dt} = m \times c_v \frac{dT}{dt} \quad (4.9)$$

W ise pistonun yer değiştirmesi ile karşılık yapılan iş:

$$W = P \frac{dV}{dt} \quad (4.10)$$

Silindir içerisindeki dolgu ideal gaz kabul edildiğinde:

$$\frac{dQ_n}{dt} = P \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt} \quad (4.11)$$

İdeal gaz denkleminde, R katsayısının sabit olduğu kabul edilirse ve türev alınırsa:

$$PV = mRT \quad (4.12)$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} \quad (4.13)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mR} \left[P \frac{dV}{dt} + V \frac{dP}{dt} \right] \quad (4.14)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (4.11) ile Denklem (4.14) birleştirilirse:

$$Q_n = \left[\frac{c_v}{R} + 1 \right] P \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} V \frac{dP}{dt} \quad (4.15)$$

Denklem (4.15)'de zaman yerine (t) krank açısı (θ) konulursa ve özgül ısılar oranı (k) denkleme eklenirse ısı dağılımı aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$Q_n = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (4.16)$$

Isı transferi alt modeli hesaplandıktan sonra toplam ısı dağılımı olan Q_d , net ısı salınımı (Q_n) ile silindir duvarlarına olan ısı transferinin (Q_d) toplamına eşittir. Bu durumda aşağıdaki denklem elde edilmiştir:

$$Q_t = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + Q_d \quad (4.17)$$

Isı salınımı, denklem (4.17)'da verildiği gibi hesaplanmıştır. Daha sonra bu veriler grafikler haline getirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak laboratuvar şartlarında yüksek SYA içeren hindi rendering yağından biyodizel üretilmiş ve yakıt özellikleri belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, üretilen biyodizel, petrol kökenli dizel yakıtı ile karıştırılarak tek silindirli bir dizel motorda, performans, egzoz emisyon ve yanma karakteristikleri belirlenmiş ve yorumlanmıştır.

5.1. Biyodizel Yakıt Analiz Sonuçları

Hindi rendering yağından üretilen biyodizel yakıt özellikleri Çizelge 5.1’de görülmektedir. HRYB'nin yoğunluğu, standart sınır değerler içinde 15 °C'de 885,8 kg/cm³ olarak bulunmuştur. Biyodizelin serbest ve toplam gliserin miktarları, ürünün ticari uygulamalar için hazır olup olmadığını belirlemek için en önemli parametrelerden ikisidir. Transesterifikasyon işleminde ara ürünler olarak oluşan monogliseric ve digliseric ayrıca biyodizelin saflığı hakkında bilgi verir. Üretilen biyodizelin serbest ve toplam gliseric değerleri çok düşüktür ve EN14214 ve ASTM-D6751 standartlarına uygundur. HRYB'nin ester içeriği % 96,7 bulundu ve bu değer standartlara uygundur. Yakıtın akışı yeteneği olan viskozite, yakıt atomizasyonunu etkilediği için yanmanın kalitesini etkilemektedir. HRYB'nin viskozitesi EN14214 ve ASTM D6751 biyodizel standartlarına uygun olarak 4,49 mm²/s çıkmıştır. Elde edilen biyodizelin parlama noktası 178,1 °C olup ASTM ve EN standartlarını karşılamıştır. Yakıtın yaşlanmasını etkileyen HRYB'nin asit değeri, biyodizel standartlarının maksimum değerinin altında olan 0,486 mgKOH/g olup, HRYB'nin serbest yağ asidi içeriğinin korozyon ve pompa tıkanması gibi operasyonel problemlere neden olmayacağına işaret etmektedir. Üretilen biyodizelin ısıtma değeri, biyodizel standart sınırları içinde fakat dizel yakıtın biraz altında 40,68 MJ/kg bulundu. Bütün bu analiz sonuçları, yüksek kaliteli biyodizel yakıtının Türkiye’de işleme yağından üretililebildiğini ve modern dizel motorlarda sorunsuz ve herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 5.1. Hindi rendering yağı biyodizelin özellikleri

Özellikler	Birim	EN 14214: 2012+A1:2014	ASTM D6751–15	Test Metodu	HRYB
Yoğunluk (at 15 °C)	kg/m ³	860–900	-	EN ISO 12185	885,8
Düşük ısıtma değeri	Mj/kg	-	-	ASTM D 240	40,68
Kinematik viskozite (at 40 °C)	mm ² /s	3,5–5,0	1,9-6,0	EN ISO 3104	4,49
Parlama noktası	°C	101 min.	130 min.	EN ISO 3679	178,1
Setan sayısı	-	51 min.	47 min.		52,4
Ester içeriği	% (kütlesele)	96,5 min.	-	EN 14103	96,7
Akma noktası	°C	-	-	ISO 3016	4
Su içeriği	mg/kg	500 mak.	-	EN ISO 12937	431
Asit değeri	mgKOH/g	0,50 mak.	0,50 mak.	EN 14104	0,486
Serbest gliserin	% (kütlesele)	0,02 mak.	0,02 mak.	EN 14105	<0,001
Monoglisericidler	% (kütlesele)	0,70 mak.	-	EN 14105	0,061
Diglisericidler	% (kütlesele)	0,20 mak.	-	EN 14105	0,0643
Triglisericid	% (kütlesele)	0,20 mak.	-	EN 14105	0,0017
Toplam gliserin	% (kütlesele)	0,25 mak.	0,24 mak.	EN 14105	0,0036
Metanol içeriği	% (kütlesele)	0,20 mak.	0,20 mak.	EN 14110	0,014

5.2. Motor test sonuçları

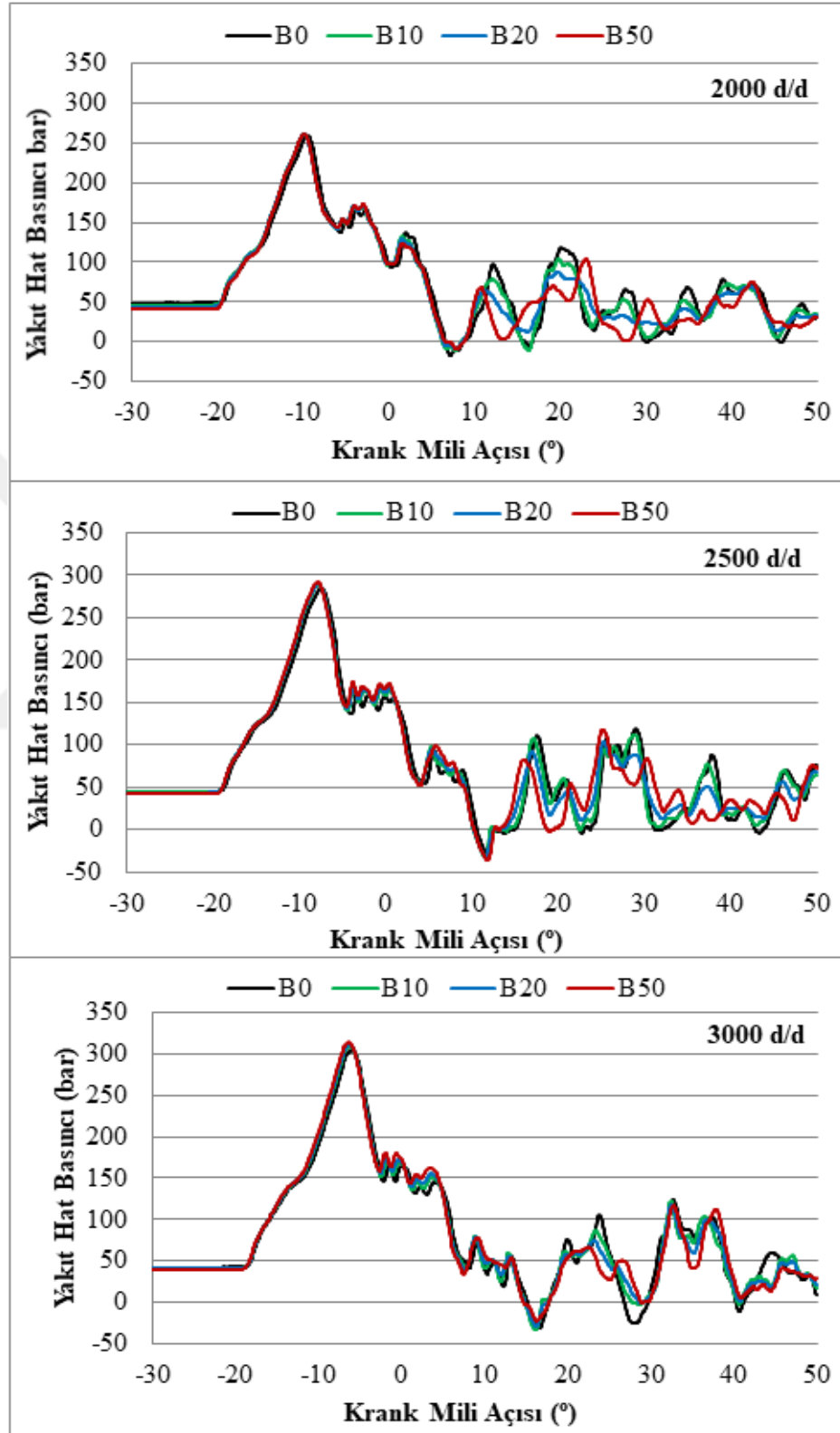
Bu bölümde, biyodizel karışımlarının enjeksiyon ve yanma karakteristikleri, motor performansları ve egzoz emisyon sonuçları incelenmiştir.

5.2.1. Yanma Karakteristikleri

5.2.2.1. Enjeksiyon Başlangıcı ve Tutuşma Gecikmesi

Yakıtların enjeksiyon başlangıcı yakıt hat basıncı ölçülerek tespit edilmiştir. Şekil 5.1’de yakıt hat basıncının farklı motor devirlerinde değişim grafikleri görülmektedir. Yapılan bu çalışmada kullanılan dizel motorun yüksek basınç yakıt pompası sıra tipi yakıt pompasıdır. Mekanik pompalı dizel yakıt sistemlerinde,

yüksek basınç pompasında sıkıştırılan ve basıncı yükseltilen yakıt enjektöre gönderilmektedir. Yakıt hattı basıncının enjeksiyon açılma basıncından daha yüksek



Şekil 5.1. Yakıt hattı basıncı değişimleri.

olması ile birlikte yakıt enjeksiyonu başlamaktadır. Eğer kullanılan yakıtın sıkıştırılabilirliği daha az ise yakıt enjeksiyon basıncı daha hızlı artacak ve püskürtme daha önce başlayacaktır (Tat, 2000). Dolayısıyla, kullanılan yakıtın özellikleri doğrudan yakıt hattı basıncına etki edecektir. Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi, bu çalışmada enjektör iğnesi açılma sensörü kullanılmadığı için püskürtme başlangıcı, enjektör açılma basıncı referans alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.2’de farklı test yakıtlarının tam yükte motor devrine göre yakıt püskürtme başlangıcı ve yanma karakteristiklerinin değişimleri görülmektedir. Çizelgede de görüldüğü gibi, tüm test şartlarında biyodizel karışımlarının püskürtme başlangıçları daha erken gerçekleşmiştir. Bunun sebebi biyodizelin yoğunluğunun ve viskozitesinin yüksek olması dolayısıyla yakıt hat basıncının enjektör açılma basıncı olan 207 bar’a daha erken ulaşmasıdır. Yüksek devirlerde motorin ve biyodizellerin enjeksiyon başlangıcı ve tutuşma gecikmesi azalmaktadır. Bunun nedeni ise, yukarıda belirtildiği gibi biyodizelin sıkıştırılabilirliğinin daha az olmasıdır. Benzer olarak, Monyem yapmış olduğu doktora çalışmasında, tam yükte yapılan testlerde motorine kıyasla biyodizel için enjeksiyon zamanının yaklaşık 2 krank mili açısı (°KMA) önce gerçekleştiğini tespit etmiştir (Monyem, 1998).

Biyodizel miktarının artması ile birlikte yanma başlangıçlarının daha geç krank açılarındaki olduğu görülmektedir. Biyodizel miktarı arttıkça kullanılan yakıtın setan sayısının düşmesi ve Biyodizel içeren karışımların püskürtme başlangıçlarının daha geç krank açılarındaki olması bu yakıtlar için yanma başlangıçlarının ÜÖN’ya daha yakın gerçekleşmesine neden olmuştur. Motor devrinin artmasıyla birlikte genel olarak yanma başlangıcı daha erken krank açılarındaki meydana gelmiştir.

Tutuşma gecikmesi değerleri karşılaştırıldığında, motor devrinin artması ile birlikte genel olarak tutuşma gecikmesinin de arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak, yakıtın fiziksel ve kimyasal tutuşma gecikmesi süre olarak aynı olmasına rağmen, bu süre zarfında krank milinin daha fazla açı katetmesi gösterilebilir. Biyodizeller kendi aralarında karşılaştırıldığında, HRYB yakıtının setan sayısının bir miktar daha düşük olması ve püskürtmenin daha erken krank açılarındaki başlaması tutuşma gecikmesi değerlerinin artışına sebep olmuştur.

Motor devrinin artması ile birlikte genel olarak toplam yanma süresinin kısaldığı görülmektedir. Bunun muhtemel sebebi, yüksek devirlerde tutuşma gecikmesinin daha uzun sürmesinden dolayı yakıtın daha fazla bir kısmının ön karışımli yanma fazında yanması olabilir. Biyodizel karışımlarının yanma sürelerinin motorine kıyasla tüm devirler için daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, yukarıda da belirtildiği gibi biyodizel içeren karışımların tutuşma gecikmeleri petrol kökenli dizel yakıta kıyasla daha uzun olduğundan yanma difüzyon fazından daha çok ön karışımli yanma fazında gerçekleşmekte ve toplam yanma süresi azalmaktadır.

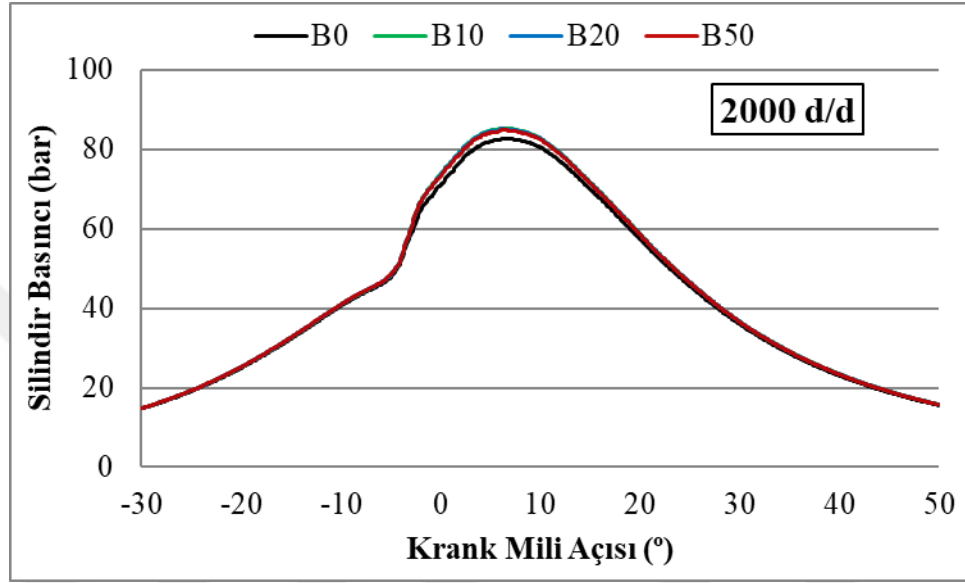
Çizelge 5.2. Püskürtme ve yanma karakteristikleri

Motor Devri	Yakıt	Püskürte Başlangıcı	Tutuşma Gecikmesi	Yanma Başlangıcı	Yanma Sonu	Yanma Süresi
		(°KMA)	(°KMA)	(°KMA)	(°KMA)	(°KMA)
2000 d/d	B0	-11.7	8.50	-3.20	42.27	45.48
	B10	-12.1	8.72	-3.38	40.49	43.87
	B20	-12.1	8.73	-3.37	40.38	43.76
	B50	-12.1	8.74	-3.36	40.23	43.60
2500 d/d	B0	-10.5	9.49	-1.01	41.53	42.54
	B10	-10.9	9.76	-1.14	39.92	41.05
	B20	-10.9	9.69	-1.21	39.43	40.64
	B50	-11	9.68	-1.32	38.70	40.02
3000 d/d	B0	-9.4	10.37	0.97	42.93	41.96
	B10	-9.7	10.59	0.89	40.32	39.43
	B20	-9.8	10.60	0.80	39.98	39.18
	B50	-9.9	10.56	0.66	39.47	38.80

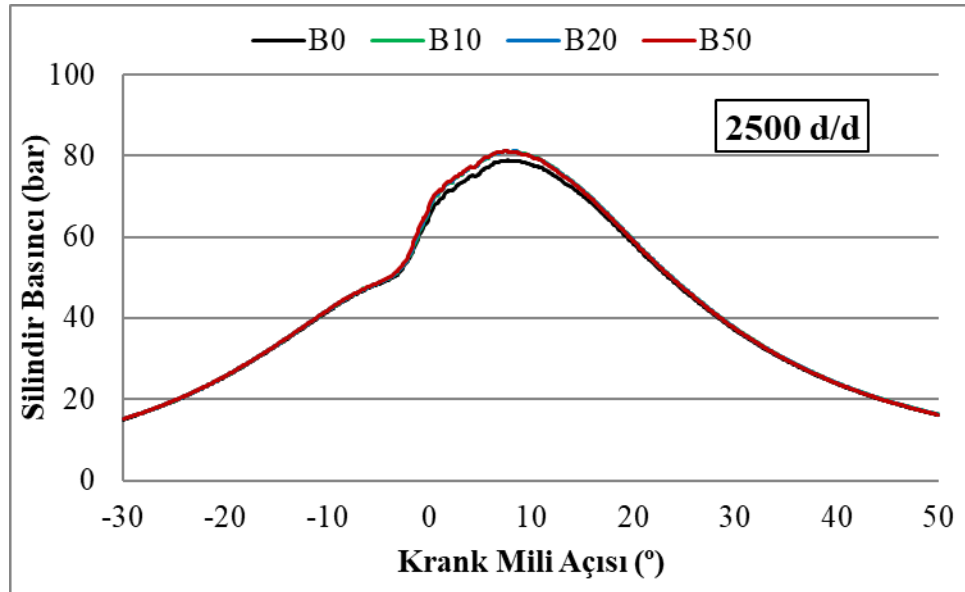
5.2.2.2.Silindir gaz basıncı

Tüm test yakıtları için farklı motor devirlerinde, silindir basıncı değişimleri Şekil 5.2, 5.3 ve 5.4'te görülmektedir. Ayrıca maksimum silindir basıncı değerleri ve yerleri Çizelge 5.3'te görülmektedir. Biyodizel karışımlarının silindir basınç değişimleri incelendiğinde, motorine kıyasla maksimum basınç değerlerinin tüm devirlerde genel olarak bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak, biyodizellerin tutuşma gecikmesinin daha yüksek olması söylenebilir. Tutuşma gecikmesi sırasında silindirde biriken yakıtın birden yanması ile maksimum

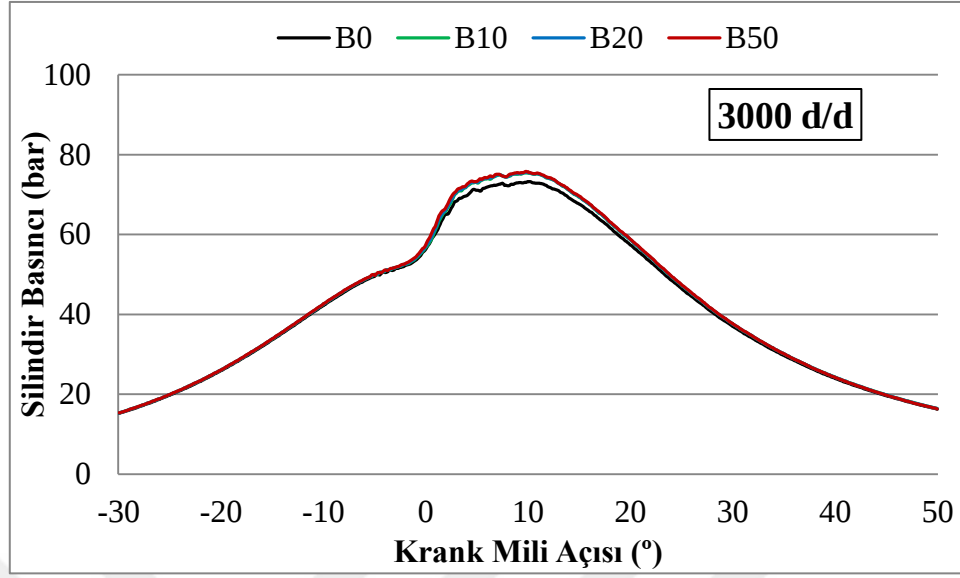
silindir basıncı artmaktadır. Devir sayısının artması ile maksimum silindir basıncının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi, yüksek devirlerde yanma, daha fazla genişleme fazına doğru kaydığı için maksimum basınç düşük devirlereki kadar yükselememektedir. Aynı devirde yakıt karışımında biyodizel oranı arttıkça maksimum silindir basıncının azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.2. Tam yükte, 2000 d/d’da silindir basıncı değişimi.



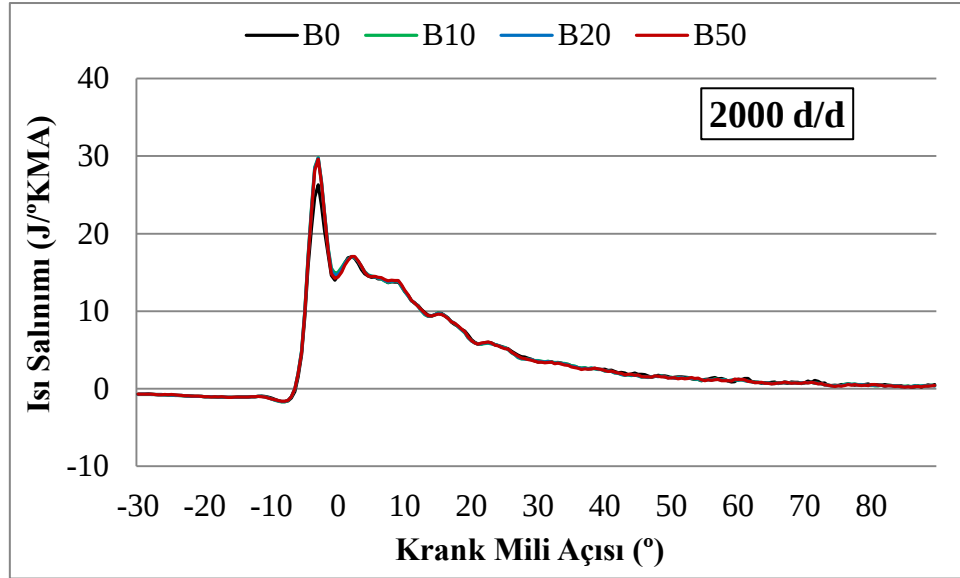
Şekil 5.3. Tam yükte, 2500 d/d’da silindir basıncı değişimi.



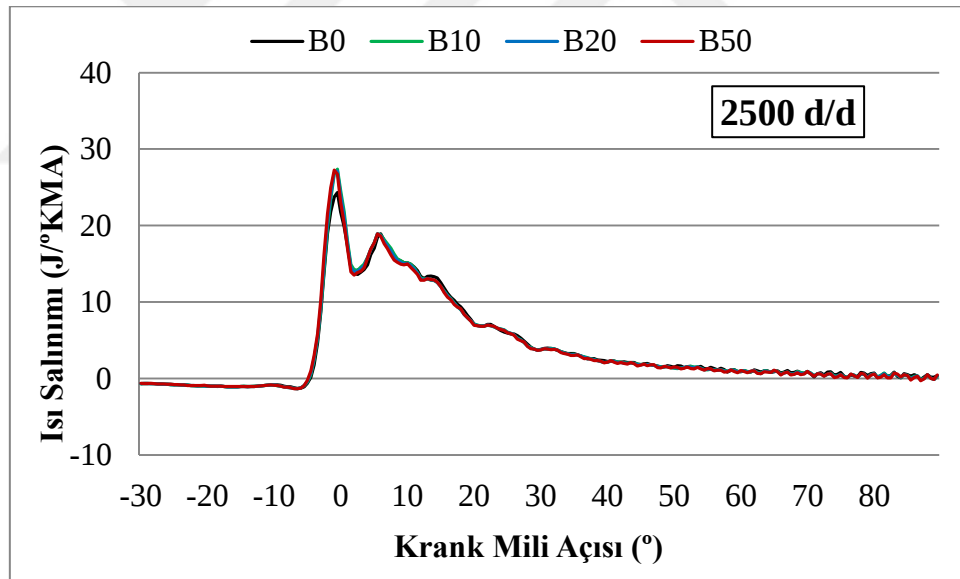
Şekil 5.4. Tam yükte, 3000 d/d’da silindir basıncı değişimi.

5.2.2.3. Isı Salınım Oranı

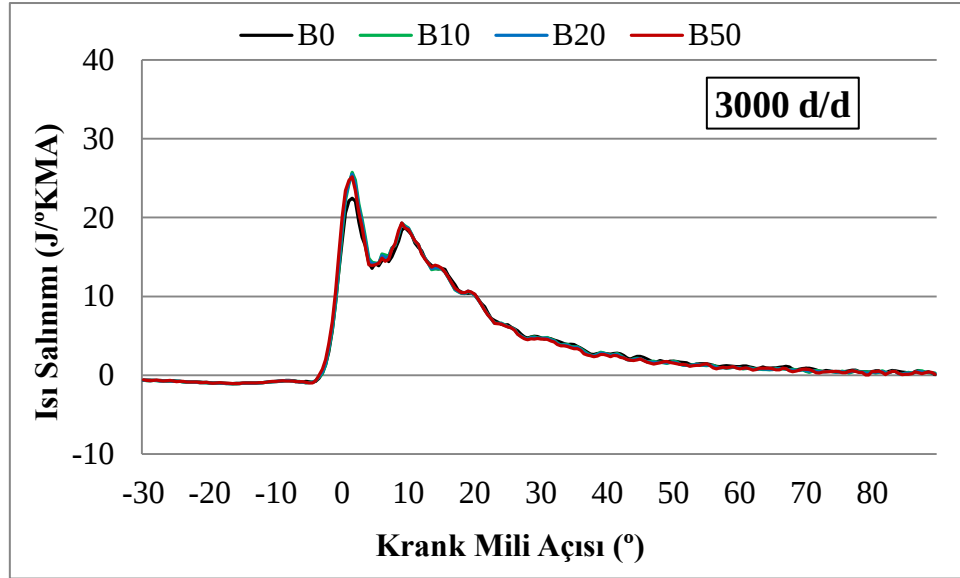
Tam yükte, farklı motor devirlerinde, ısı salınım oranındaki değişim grafikleri Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7’de görülmektedir. Ayrıca maksimum ısı salınım değerleri ve yerleri Çizelge 5.3’te görülmektedir. Isı salınım grafiklerinde ve Çizelge 5.3’te görüldüğü gibi, devir sayısının artması ile maksimum ısı salınımının bir miktar azaldığı görülmüştür. Ayrıca, biyodizel karışımlarının motorine göre maksimum ısı salınım değerlerinin tüm devirlerde genel olarak bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak, maksimum silindir basınçlarının daha yüksek olma nedeninin izahında söylendiği gibi biyodizellerin tutuşma gecikmesinin daha yüksek olması söylenebilir. Tutuşma gecikmesi sırasında silindirde biriken yakıtın birden yanması ile yanma olayı daha çok ön karışımli yanma fazında gerçekleşmekte ve sonuç olarak maksimum ısı salınım değerleri daha yüksek olmaktadır. Biyodizel karışımları kendi aralarında kıyaslandığında ise, karışım içerisinde biyodizel oranının artmasıyla birlikte maksimum ısı dağılım oranının yeri daha önce olmaktadır. Bunun sebebi olarak, biyodizel miktarı arttıkça karışımın setan sayısının azalması ve bunun da yanmanın daha geç başlamasına neden olması gösterilebilir.



Şekil 5.5. Tam yükte, 2000 d/d'da ısı salınımı değişimi.



Şekil 5.6. Tam yükte, 2500 d/d'da ısı salınımı değişimi.



Şekil 5.7. Tam yükte, 3000 d/d’da ısı salınımı değişimi.

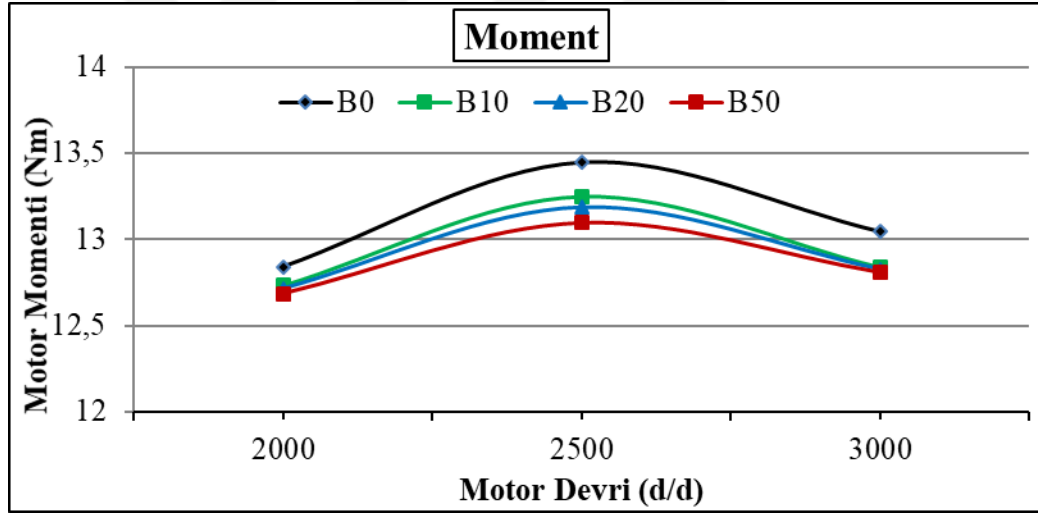
Çizelge 5.3. Maksimum silindir basıncı ve ısı salınımı değerleri ve yerleri

Motor Devri	Yakıt	Max. Silindir Basıncı	Max. Silindir Basıncı Yeri	Max. Isı Salınımı	Max. Isı Salınım Yeri
		(bar)	(°KMA)	(J/°KMA)	(°KMA)
2000 d/d	B0	82.63	6.58	26.31	-2.53
	B10	85.25	6.49	29.89	-2.56
	B20	85.04	6.51	29.80	-2.56
	B50	84.73	6.54	29.66	-2.55
2500 d/d	B0	78.81	8.05	24.60	-0.13
	B10	81.08	8.07	27.56	-0.12
	B20	81.07	7.94	27.62	-0.20
	B50	81.06	7.74	27.71	-0.33
3000 d/d	B0	73.17	9.92	23.05	1.96
	B10	75.39	9.83	26.07	2.01
	B20	75.50	9.74	25.84	1.92
	B50	75.67	9.59	25.49	1.79

5.2.3. Motor performansı

5.2.3.1. Moment

Şekil 5.8’de biyodizel karışımları ve referans dizel yakıtının motor devrine bağlı olarak elde edilen motor moment grafikleri görülmektedir. Biyodizel karışımlarının tüm devirlerde referans dizel yakıtına kıyasla daha düşük bir moment değerine sahip olduğu görülmektedir. Grafikler incelendiğinde maksimum moment değerinin referans dizel yakıtı için 2500 d/d’da 13,44 Nm olduğu görülmektedir. Biyodizel karışımları kendi aralarında kıyaslandığında ise, en yüksek momente, B10 yakıtının sahip olduğu görülmüştür. Biodizel oranının artmasıyla birlikte moment değerinin de azaldığı görülmüştür.

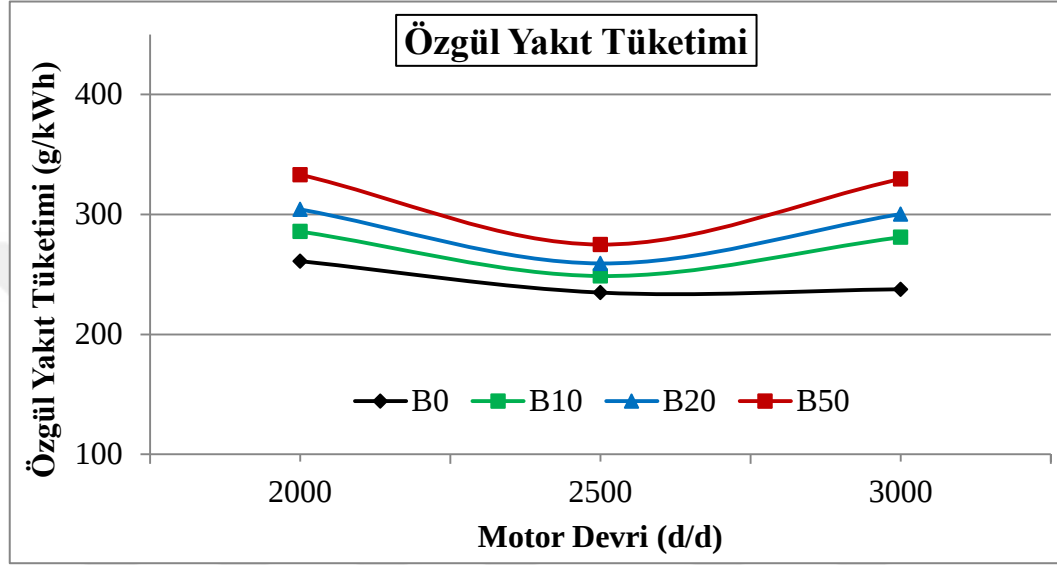


Şekil 5.8. Tam yükte motor momentlerinin devre göre değişimi.

5.2.3.2. Özgül Yakıt Tüketimi

Motor testlerinde, performans karşılaştırılması için en önemli parametrelerden birisi de özgül yakıt tüketimidir. Test yakıtlarının tam yükte, 2000, 2500 ve 3000 d/d’daki özgül yakıt tüketim değerlerindeki değişim Şekil 5.9’da verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı üzere özgül yakıt tüketimin minimum olduğu yer 2500 d/d’dır. Bunun sebebi, bu motor devrinin, test motorunun en verimli çalıştığı

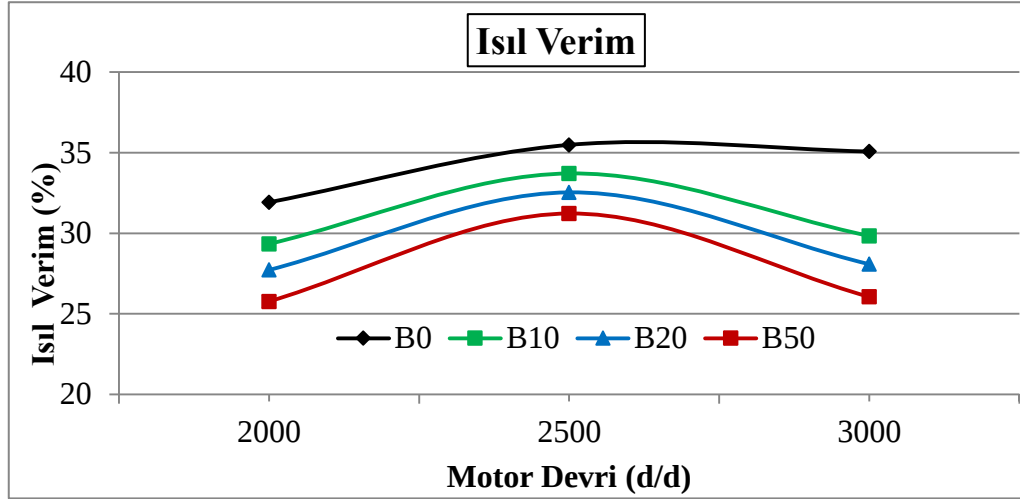
devir olan maksimum tork devrine (2400 d/d) yakın olmasıdır. Referans dizel yakıtın özgül yakıt tüketimi, daima hindi yağı biyodizel karışımlarındaki özgül yakıt tüketiminden az olmuştur. Karışım içerisindeki hindi yağı biyodizelin oranı arttıkça özgül yakıt tüketiminin daha da arttığı görülmüştür. Biyodizelin ısı değeri düşük olduğu için özgül yakıt tüketimindeki bu artış beklenen bir durumdur.



Şekil 5.9. Tam yükte özgül yakıt tüketimlerinin devre göre değişimi.

5.2.3.3. Isıl verim

Isıl verim farklı yakıtların motor performanslarının karşılaştırılmasında diğer önemli bir özelliktir. Daha önceki kısımlarda belirtildiği gibi, ısı verim motordan alınan faydalı gücün motora sürülen enerji miktarına oranı olarak ifade edilmektedir. Tüm test yakıtları için elde edilen ısı verim değerleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Tam yükte motor devrinin artmasıyla birlikte ısı verim değerlerinin 2500 d/d'ya kadar artış gösterdiği daha sonra 3000 d/d'da tekrar azaldığı gözlenmiştir. 2500 d/d'da ısı verimin yüksek olmasının sebebi, özgül yakıt tüketiminin düşük olmasının izahında söylendiği gibi, bu motor devrinin test motorunun en verimli çalıştığı devir olan maksimum tork devrine (2400 d/d) yakın olmasıdır.



Şekil 5.10. Isıl verimlerin değişimi.

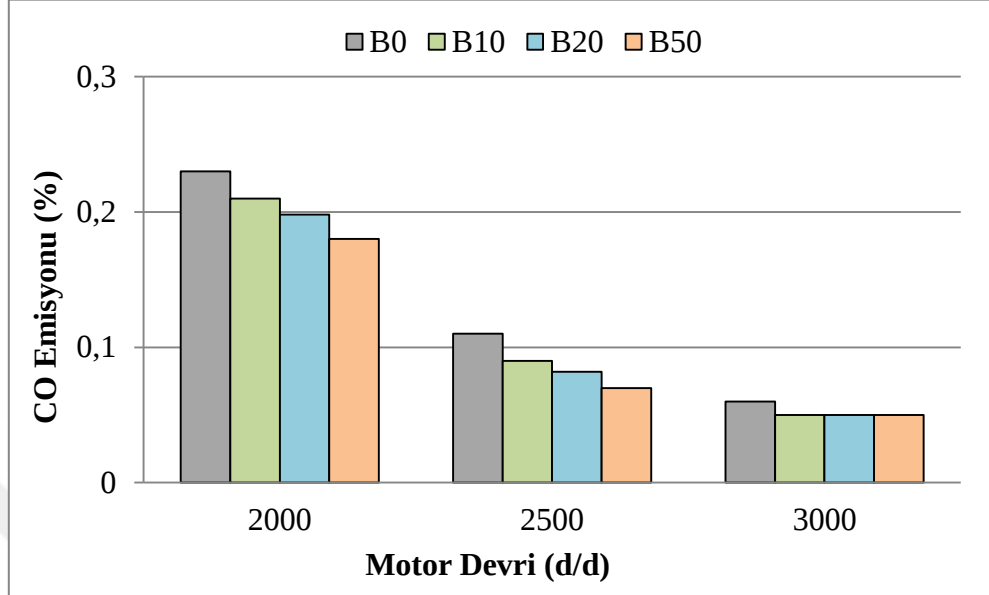
5.2.4. Egzoz Emisyonları

Bu kısımda tüm test yakıtları için elde edilen egzoz emisyon sonuçları tartışılmıştır. Çalışma kapsamında ölçülen ve yorumlanan egzoz emisyonları, karbonmonoksit, azot oksitler ve is emisyonlarıdır.

5.2.4.1. CO Emisyonları

CO emisyonu renksiz, kokusuz ve zehirleyici bir gazdır. Karbonun, CO₂'e dönüşmesi için oksijenin yetersiz olduğu durumlarda CO emisyonu ortaya çıkmaktadır. CO emisyonlarını etkileyen en önemli faktör yakıt/hava eşdeğerlik oranıdır. CO oluşumuna etki eden diğer etmenler önem sırası olarak bu parametreden sonra gelmektedir. Hava ve yakıtın iyi karışmaması, lokal zengin bölgeler ve eksik yanma CO emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır. (Ferguson, 2006). Motorin ile B10, B20 ve B50 yakıtlarının tam yükte değişik motor devirlerine göre CO değişim grafikleri Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Biyodizel karışımlarında, biyodizel miktarının artması ile birlikte tüm yükler için CO emisyonunun azaldığını tespit etmişlerdir. Biyodizel yakıtın oksijen içeriğinin fazla olması daha düşük CO emisyonlarının sebebi olarak gösterilir. Düşük devirlerde yanma olayının iyi gerçekleşmemesinden dolayı CO emisyon değerleri bütün yakıtlar için fazla

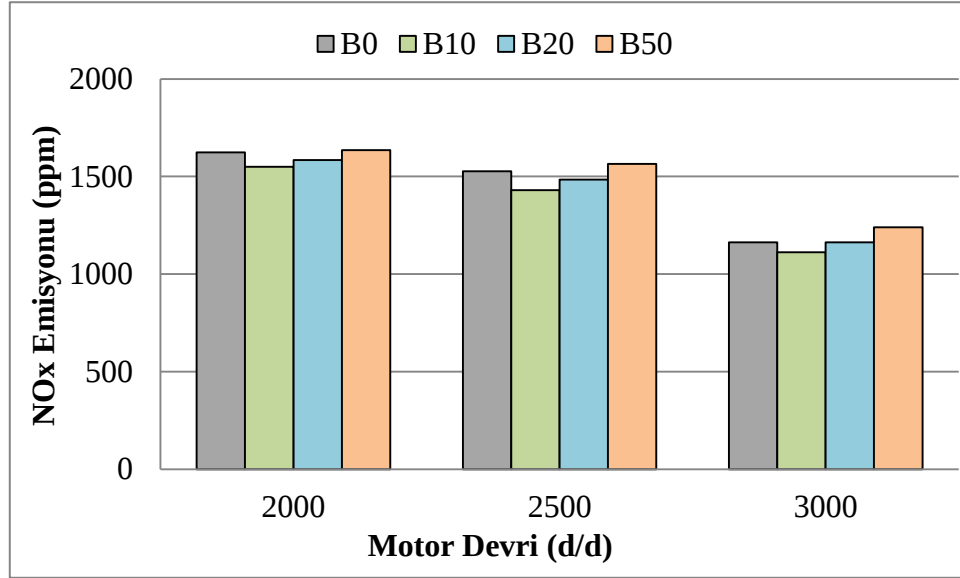
çıkmiştir. Motor devrinin artmasıyla birlikte, CO emisyonlarının azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 5.11. CO emisyonu değişimi.

5.2.4.2. NO_x Emisyonları

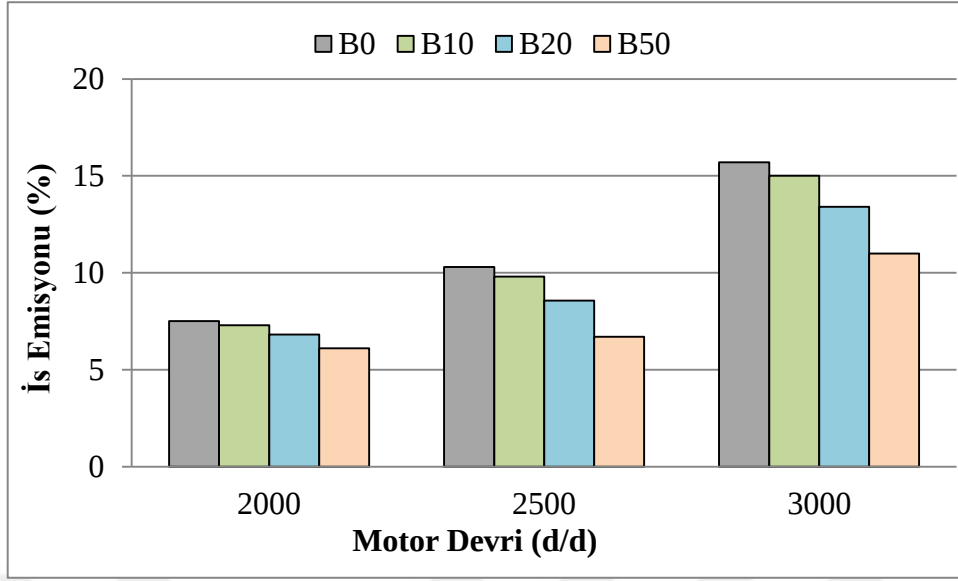
Sekil 5.12’de, B0 ile B10, B20 ve B50 yakıtlarının kullanımı durumunda elde edilen NO_x emisyonlarının motor devrine göre değişim grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde petrol kökenli dizel yakıtı biyodizel ilavesinin NO_x emisyonlarında çok büyük bir değişime neden olmadığını göstermektedir. 2000 d/d’ya kıyasla 2500 d/d’larda NO_x emisyonlarının devire bağlı olarak çok az azaldığı fakat 3000 d/d’da daha görünür bir şekilde azaldığı görülmüştür. B10 yakıtı referans dizel yakıtı B0’göre biraz daha düşük NO_x emisyonlarına sahip olduğu görülmektedir. Fakat karışım içerisindeki biyodizel katkı oranının artmasıyla birlikte NO_x emisyonlarının tüm devirler için arttığı görülmüştür. Hatta B50 yakıtının B0 yakıtından çok az daha fazla NO_x emisyonlarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. NO_x emisyonu değişimi.

5.2.4.3. İş Emisyonları

B0 ile B10, B20, B50 yakıtlarının motor devrine bağlı olarak iş emisyonlarındaki değişimleri Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, petrol kökenli dizel yakıtın tüm motor devirlerinde en yüksek iş emisyonlarına sahip olduğu görülmektedir. Biyodizel katkı oranının artmasıyla birlikte iş emisyonlarının azaldığı görülmüştür. B50 yakıtının oksijen içeriğinin yüksek olmasına bağlı olarak minimum iş yoğunluğu değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, motor devrinin artmasıyla birlikte yanma süresi de azaldığından tüm yakıtlar için iş emisyonlarının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.13. Is emisyonu değişimi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu araştırmada atık olarak nitelendirilen hindi rendering yağından biyodizel üretilmiştir. Üretilen HRYB yakıtı petrol kökenli dizel yakıtı ile hacimsel olarak %10, %20, %50 oranlarında karıştırılarak elde edilen yakıt karışımları (B10, B20 ve B50) tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorda test edilmiş ve referans petrol kökenli dizel yakıtı (B0) ile karşılaştırılmıştır. Motor testleri tam yükte ve değişik motor devirlerinde (2000, 2500 ve 3000 d/d) gerçekleştirilerek yanma karakteristikleri, motor performansları ve egzoz emisyonları belirlenmiştir. Bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Biyodizel dizel motorlarda herhangi bir ayar ve değişiklik yapılmadan saf veya dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanılabilir. Hindi rendering yağından elde edilen biyodizel kullanımı petrolde dışa bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olmaktadır.
- Hindi rendering yağının biyodizele dönüştürülerek geri kazanımı, bu yağların çevreye verdiği zararı ortadan kaldırması ve ayrıca biyodizelin dezavantajlarından biri olan yüksek maliyeti azaltması açısından oldukça önemlidir.
- HRYB'in setan sayısı daha düşük olduğu için, tutuşma gecikmesi daha uzun sürmektedir. Buna bağlı olarak ta biyodizel karışımlarının maksimum silindir basıncı ve ısı salınımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Biyodizelin ısı değeri dizel yakıtı göre daha düşük olmasından dolayı moment ve ısı veriminde bir miktar azalma, özgül yakıt tüketiminde bir miktar artış olduğu belirlenmiştir. Ancak, bu durumun motor çalışma şartlarını önemli ölçüde etkileyecek bir seviyede olmadığı düşünülmektedir.
- CO emisyonları incelendiğinde dizel yakıtına kıyasla biyodizel karışımlarında bir azalma olduğu görülmüştür. Karışım içerisindeki biyodizel oranı arttıkça CO

emisyollarındaki azalma artmaktadır. Biyodizel karışımlarının kullanılması ile CO emisyonundaki azalmanın temel nedeninin biyodizel yakıtının oksijen içeriğinin yüksek olmasının olduğu düşünülmektedir.

- B10 yakıtının referans dizel yakıtı B0'göre biraz daha düşük NO_x emisyonlarına sahip olduğu görülmüştür. Fakat karışım içerisindeki biyodizel katkı oranının artmasıyla birlikte NO_x emisyonlarının tüm devirler için arttığı görülmüştür. Hatta B50 yakıtının B0 yakıtından çok az daha fazla NO_x emisyonlarına sahip olduğu görülmektedir.
- Hindi rendering yağı biyodizel karışımları kullanıldığında dizel yakıtına göre daha düşük is emisyonlarına sahip olduğu görülmüştür. Biyodizel karışımları kullanıldığında is emisyonlarının dizel yakıtına göre düşük çıkmasının nedeni biyodizelin yakıtın yüksek oksijen içeriği ve düşük C/H oranı gösterilebilir.
- Hindi rendering yağıbiyodizel karışımlarının petrol kökenli dizel yakıtı ile benzer özellikler göstermesi ve egzoz emisyonlarını azaltıcı yönde etkilerinden dolayı dizel yakıtı alternatif bir yakıt olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Alptekin E, Canakci M, (2009) Characterization of the key fuel properties of methyl ester-diesel fuel blends, *Fuel*, 88, 75-80.
- Artukoğlu B D, Keskin A, Koca A, (2009) Biodiesel production from waste animal fat and improvement of its characteristics by synthesized nickel and magnesium additive, *Energ. Convers. Manage.* 50, 498-502.
- Altınsoy A S, (2007) “Biyodizel üretimi, motorlarda kullanımı ve Türkiye’deki kaynakların incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bahadur N P, Boocock D G B, Konar S K, (1995) “Liquid hydrocarbons from catalytic pyrolysis of sewage sludge lipid and canola oil: evaluation of fuel properties”, *Energ. Fuel*, 9, 248-256.
- Berchmans H J, Hirata S, (2008) “Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids”, *Bioresource Technol.*, 1716-1721
- Bhatti H N, Hanif M A, Qasim M, Rehman A, (2008) “Biodiesel production from waste tallow”, *Fuel*, 87, 2961-2966.
- Canakci M, (2001) “Production of biodiesel from feedstocks with high free fatty acids and its effect on diesel engine performance and emissions”, Doctoral Thesis, Iowa State University, Iowa.
- Canakci M, Van Gerpen J H, (2001) “Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids”, *T. ASABE.*, 44, 1429-1436.
- Caringal W V, (1989) “Process development and economic analysis of rapeseed methyl ester”, Master of Science Thesis, Idaho University, Graduate School of the University of Idaho, Idaho.
- Caro P S, Mouloungui Z, Vaitilingom G, Berge J C, (2001) “Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines”, *Fuel*, 80, 565-574.
- Chung K H, Kim J, Lee K Y, (2009) “Biodiesel production by transesterification of duck tallow with methanol on alkali catalysts”, *Biomass Bioenerg.*, 33, 155-158
- Çetinkaya M, Karaosmanoğlu F, (2004) “Optimization of base-catalyzed transesterification reaction of used cooking oil”, *Energ Fuel.*, 18, 1888- 1895.
- Çildir O, (2003) “Bitkisel Metil Esterlerinden Dizel Motorlar İçin Yakıt Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli

- Çolak S, Zengin G, Özgünay H, Sarı O, Sarıkahya H, Yüceer L, (2005) "Utilisation of leather industry pre-fleshings in biodiesel production", J Am Leather Chem. As, 100, 137-14
- Dias J M, Alvim-Ferraz M C M, Almeida M F, (2009) "Production of biodiesel from acid waste lard", Bioresource Technol, 100, 6355-6361.
- Felizardo P, Correia M J N, Raposo I, Mendes J F, Berkemeier R, Bordado J M, (2006) "Production of biodiesel from waste frying oils", Waste Manage, 26, 487-494.
- Ferguson C R, Kirkpatrick A T, (2006) "Internal combustion engines: applied thermo sciences", 2nd ed, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Freedman B, Pryde E H, Mounts T L, (1984) "Variables affecting the yields offatty ester from transesterified vegetable oils", J. Am. Oil Chem. Soc., 61, 1638-1643
- Goering C E, Schwab A W, Dangherty M J, Pryde E H, Heakin A J, (1982) "Fuel properties of eleven vegetable oils", T ASABE , 25, 1472-1477.
- Graboski M S, Mc Cormik R L, (1998) "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines", Prog. Energ. Combust, 24, 125-164.
- Haşımoğlu, C (2005) "Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-9, 16-23
- Heywood J B, (1998) "Internal combustion engines Fundamentals", 1st ed., McGraw Hill Book Company, New York.
- He B B, Van Gerpen J H, Thompson J C, (2009) "Sulfur content in selected oils and fats and their corresponding methyl esters", Appl. Eng. Agric., 25, 223-226.
- <http://www.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/bitkiselatikyonetmeligi.pdf>
- <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=246601>.
- Kaplan C, (2001) "Ayçiçek Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kinast A J, (2001) "Production of biodiesels from multiple feedstocks and properties of biodiesels and biodiesel-diesel blends", National Renewable Energy Laboratory, 1-47, NREL/SR-510-31460.
- Knothe G, (2006) "Analyzing biodiesel: standard and other methods", J Am. Oil Chem. Soc., 83, 823-833.
- Kolomaznik K, Barinova M, Furst T, (2009) "Possibility of using tannery waste for

- biodiesel production”, J. Am. Leather Chem. As., 104, 177-82.
- Kondamudi N, Strull J, Misra M, Mohapatra S K, (2009) “A green process for producing biodiesel from feather meal”, J Agr Food Chem, 57, 6163-6166.
- Marchetti J M, Errazu A F, (2008) “Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides”, Biomass Bioenerg, 32,892-895.
- Monyem A., (1998) “The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions”, Doctoral Dissertation, Iowa State University, Graduate College of Iowa State University, Iowa.
- Özgünay H, Çolak S, Zengin G, Sari Ö, Sarikahya H, Yüceer L, (2007) “Performance and emission study of biodiesel from leather industry prefleshings”, Waste Manage., 27, 1897-1901.
- Özsezen A N, (2007) “Atık palmiye yağından üretilen biyodizelin motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi”, Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 197933.
- Peterson C L, (1986) “Vegetable oils as a diesel fuel: status and research priorities”, T. ASABE., 29, 1413-1422.
- Rashid U, Anwar F, Knothe G, (2009) “Evaluation of biodiesel obtained from cottonseed oil”, Fuel Process. Technol., 90, 1157-1163.
- Reyes, J F, Sepulveda, M A, (2006) “PM-10 emissions and power of a diesel engine fueled with crude and refined biodiesel from salmon oil”, Fuel, 1-6.
- Ryan T W, Dodge L G, Callahan T J, (1984) “The effects of vegetable oil properties on injection and combustion in two different diesel engines”, J. Am.Oil Chem. Soc., 61, 1610-1619.
- Schwab A W, Bagby M O, Freedman B, (1987) “Preparation and properties of diesel fuels from vegetable oils”, Fuel, 66, 1372-1378.
- Stauffer C E, (1996) “Fats and oils, 1st ed., Eagan Press Handbook Series, Minnesota.
- Tat M E, Van Gerpen J H , Soylu S, Canakci M, Monyem A, Wormley S, (2000) “The speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21°C from atmospheric pressure to 35 MPa”, J. Am. Oil Chem. Soc., 77, 285-289.
- Tate R E, Watts K C, Allen C A W, Wilkie K I, (2006) “The viscosities of three biodiesel fuels at temperatures up to 300°C”, Fuel, 85, 1010-1015.
- Tyson S K, Biodiesel handling and use guidelines, (2001) “National Renewable Energy Laboratory Report”, NREL/TP-580-30004, 1-17.
- Van Gerpen J H, (2005) “Biodiesel processing and production”, Fuel Process.Technol.,

86, 1097-1107.

Van Gerpen J H, Shanks B, Prusko R, Clements D, Knothe G, (2004) “Biodiesel production technology”, National Renewable Energy Laboratory, NREL/SR-510-36244, 1-105.

Yenioğlu, K, V, (2009) “Biyodizel sentezi ve biyodizel katkı maddelerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya/Hatay, 1-74.



8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şenol TÜRK

Doğum Yeri ve Tarihi : Bolu, 02.01.1989

Lisans Üniversite : Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Elektronik posta :senolturk1989@gmail.com

İletişim Adresi :Sümer Mah. 2881 Sk. Batıkent Konutları B Blok

No:2 D5 Merkez / BOLU