



**MİKRODALGA ISITMA İLE ASPİR YAĞINDAN
ÜRETİLEN BİYODİZELİN MOTOR PERFORMANS
VE EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar GÜLER

Danışman

Prof. Dr. Fatih AKSOY

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kasım 2024

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.48 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKRODALGA ISITMA İLE ASPİR
YAĞINDAN ÜRETİLEN BİYODİZELİN
MOTOR PERFORMANS VE
EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Serdar GÜLER

DANIŞMAN

Prof. Dr. Fatih AKSOY

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

Kasım 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Serdar GÜLER tarafından hazırlanan “Mikrodalga Isıtma ile Aspir Yağından Üretilen Biyodizelin Motor Performans ve Emisyonlarına Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08/11/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Fatih AKSOY

Başkan : Prof. Dr. Ahmet UYUMAZ
Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi,
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi **İmza**

Üye : Prof. Dr. Fatih AKSOY
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi **İmza**

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi **İmza**

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

08/11/2024

Serdar GÜLER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRODALGA ISITMA İLE ASPIR YAĞINDAN ÜRETİLEN BİYODİZELİN MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Serdar GÜLER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fatih AKSOY

Bu çalışmada, ev tipi bir mikrodalga modifiye edilerek transesterifikasyon reaksiyonu ile aspir yağından biyodizel üretimi yapılmıştır. D100 (%100 dizel yakıtı) ve B15 (%85 dizel yakıtı + %15 biyodizel) kullanılarak motor performans ve emisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Maksimum momentin elde edildiği 1800 d/d motor devrinde ise yanma analizi gerçekleştirilmiştir. 1800 d/d motor devrinde, B15 yakıtı kullanımı ile motor momenti dizel yakıtına göre %2,66 daha düşük elde edilmiştir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketiminde ortalama olarak %9,28 artış elde edilmiştir. Dizel ve B15 yakıtları ile maksimum efektif verim sırasıyla %26,86 ve %26,27 olarak belirlenmiştir. B15 yakıtı için silindir basıncı ve ısı dağılımı değerleri dizel yakıtına göre daha az elde edilmiştir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre tutuşma gecikmesi süresinde azalma, yanma süresinde ise artış gözlenmiştir. Maksimum silindir içi basınç artış oranı dizel ve B15 yakıtları ile sırasıyla 7,118 ve 6,313 bar/KA olarak belirlenmiştir. CO ve HC emisyonları B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre daha az elde edilmiştir.

2024, ix+49 sayfa

Anahtar Kelimeler: Biyodizel 1, Mikrodalga 2, Motor Performans 3, Emisyon 4

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS OF BIODIESEL PRODUCED FROM SAFFLOWER OIL BY MICROWAVE HEATING

Serdar GÜLER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fatih AKSOY

In this study, biodiesel was produced from safflower oil by transesterification reaction by modifying a home type microwave. Engine performance and emission tests were performed using D100 (100% diesel fuel) and B15 (85% diesel fuel + 15% biodiesel). Combustion analysis was performed at 1800 rpm engine speed where maximum torque was obtained. At 1800 rpm engine speed, engine torque was obtained 2.66% lower than diesel fuel with B15 fuel. An average of 9.28% increase in specific fuel consumption was obtained with B15 fuel compared to diesel fuel. Maximum effective efficiency with diesel and B15 fuels was determined as 26.86% and 26.27%, respectively. Cylinder pressure and heat distribution values were obtained less for B15 fuel compared to diesel fuel. A decrease in ignition delay time and an increase in combustion time were observed with B15 fuel compared to diesel fuel. The maximum in-cylinder pressure increase rate was determined as 7.118 and 6.313 bar/CA with diesel and B15 fuels, respectively. CO and HC emissions were obtained lower with the use of B15 fuel compared to diesel fuel.

2024, ix+49 pages

Keywords: Biodiesel 1, Microwave 2, Engine performance 3, Emission 4

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince, yakıt üretimi, motor performans testleri, tezin yazımı sırasında katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Fatih AKSOY'a, deneysel çalışmalarda katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR ve Öğr. Gör. Dr. Emrah ERÇEK'e, yanma analizi konusunda destek olan Prof. Dr. Ahmet UYUMAZ'a, yakıt analizi konusunda destek olan Doç. Dr. Seda Şahin'e, eğitim hayatım boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen annem, babam, eşim Nihal Özgün, kızım Zeynep, oğullarım Muhammet Kağan ve Mustafa Oğuz'a sonsuz teşekkür, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışması, 22.FEN.BİL.48 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)' ne teşekkür ederim.

Serdar GÜLER

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. YAĞLAR VE BİODİZEL ÜRETİM YÖNTEMLERİ	3
2.1 Yağlar ve Aspir Bitkisi.....	3
2.2 Yakıt Olarak Yağların Kullanımı İçin Özelliklerinin İyileştirilmesi	4
2.2.1 Seyreltme	4
2.2.2 Mikroemülsiyon.....	5
2.2.3 Piroлиз.....	5
2.2.4 Transesterifikasyon	6
3. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR	13
4. MATERYAL VE METOT	18
4.1 Biyodizel Üretimi	18
4.2 Deney Verilerinin Analizi	19
4.3 Motor Test Düzenegi	20
4.3.1 Test motoru	21
4.3.2 Egzoz gaz analizörü	22
4.3.3 Basınç sensörü	23
4.3.4 Şarj amplifikatörü	23
4.3.5 Veri toplama kartı	24
4.3.6 Enkoder	24
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	25
5.1 Motor Performansı.....	25
5.2 Yanma Analizi	28

5.3 Egzoz Emisyonları.....	33
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	36
7. KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ.....	49



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A_2	Isı transferi yüzey alanı
h_c	Isı taşınım katsayısı
i	İndisleri belirli krank mili aralıkları
$\dot{m}_y$	Bir çevrimde silindire alınan yakıt miktarı
$\dot{m}Q_{LHV}$	Yakıt ile elde edilen ısı enerjisi
P	Ölçülen silindir basıncı
P_e	Motorun efektif gücü
P_i	Fonksiyonların silindir basınç sinyali
P_{max}	Maksimum basınç artış oranı
T_g	Silindir içi ortalama gaz sıcaklığı
T_{max}	Maksimum sıcaklık
T_w	Yanma odası duvar sıcaklığını
V	Silindir hacmi
V_{kurs}	Kurs hacmi
η_T	Isıl verim
W_{net}	Elde edilen faydalı iş

Kısaltmalar

B15	%85 dizel yakıtı + %15 biyodizel
B100	%100 dizel yakıtı
İMEP	İndike ortalama efektif basınç
KA	Krank açısı
KA10	Karışım kütlelerinin %10'unun yanmasını tamamladığı krank açısı
KA90	Karışım kütlelerinin %90'ının yanmasını tamamladığı krank açısı
MW	Mikrodalga
ÖYT	Özgül yakıt tüketimi
ÜÖN	Üst ölü nokta
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Transesterifikasyon reaksiyonu.....	6
Şekil 2.2 Geleneksel yöntem ile biyodizel üretimi.....	7
Şekil 2.3 Ultrasonik ses dalgası.....	8
Şekil 2.4 Kavitasyon.	9
Şekil 2.5 Elektromanyetik spektrum.	10
Şekil 2.6 Geleneksel ve mikrodalga ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması	11
Şekil 2.7 Mikrodalga ısıtma mekanizmaları	12
Şekil 4.1 Biyodizel üretiminde kullanılan deney düzeneği.....	18
Şekil 4.2 Deney düzeneği.....	21
Şekil 5.1 Test yakıtlarının motor moment ve motor gücü üzerindeki etkileri.	26
Şekil 5.2 Özgül yakıt tüketiminin değişimi.....	27
Şekil 5.3 Etkif verimin değişimi.	28
Şekil 5.4 Test yakıtlarının silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkileri.....	29
Şekil 5.5 Tutuşma gecikmesi süresi ve yanma süresinin değişimi.....	30
Şekil 5.6 Çevrimsel farklılıkların değişimi.	31
Şekil 5.7 Test yakıtlarının maksimum basınç artış oranı üzerindeki etkileri.	32
Şekil 5.8 Ardışık 50 çevrime bağı maksimum silindir basıncı değişimleri.	33
Şekil 5.9 Test yakıtlarının CO emisyonları üzerindeki etkileri.....	34
Şekil 5.10 Test yakıtlarının HC emisyonları üzerindeki etkileri.....	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Yakıt özellikleri.....	19
Çizelge 4.2 Motorun özellikleri.	22



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Aspir bitkisi ve tohumları.	4
Resim 4.1 Test motoru.	21
Resim 4.2 Bilsa MOD 2210 WIN-XP emisyon cihazı	22
Resim 4.3 Basınç sensörü.	23
Resim 4.4 Şarj amplifikatörü.	23
Resim 4.5 Veri toplama kartı.	24
Resim 4.6 Enkoder.	24



1. GİRİŞ

İnsan yaşamı için önemli bir faktörlerden biri enerjidir. Enerji kaynakların kullanılması toplumların teknolojik ve ekonomik açıdan gelişimine katkı sağlamıştır. Toplumların gelişimi, istikrarı ve huzurunu etkileyen enerji sorunları sadece yenilenebilir enerji kaynakları ile giderilebilir (Kiani 2014).

Dünyada fosil kökenli enerji kaynaklarının rezervlerinin sınırlı olması, çevreye olumsuz etkileri, ülkelere eşit oranda dağılmamaları sebebiyle sürdürülebilir bir enerji ve sürdürülebilir bir yaşam sunmamaktadır (Aydın 2010).

İçten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıt biyodizel ve etanoldür. Nüfusumuzun büyük bir bölümü tarım ve hayvancılık ile geçimlerini sağlamaktadır. Bu nedenle bitkisel ya da hayvansal yağlardan elde edilen biyodizel, yenilenebilir ve çevre dostu alternatif bir yakıttır. Biyodizel endüstriyel sanayinin gelişmesine, üretime ve devletlerin güçlenmesine katkıda bulunabilecek stratejik konuma sahiptir (Alptekin ve Çanakçı 2006, Deniz 2013).

Biyodizel, yağlardan elde edilen uzun zincirli mono alkil esteri olarak ifade edilmektedir. “Biyo” kelimesi biyolojik (hayvansal ya da bitkisel) yollarla elde edildiğini, “dizel” kelimesi ise sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanılabildiğini belirtmektedir (Özdemir ve Mutlubaş 2016, Kaşıkçı 2009).

Biyodizel ham petrolden elde edilen dizel yakıtına benzer özelliklere sahiptir (Kiani 2014). Bu nedenle sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda ilave bir düzenleme gerektirmeden saf veya dizel yakıtı ile karıştırılarak kullanabilmektedir (Kiani 2014, Yüksel 2017). Biyodizel kolay çözünebilir, çevre dostu ve toksin etkisi olmayan alternatif bir yakıttır (Alptekin ve Çanakçı 2006, Özdemir ve Mutlubaş 2016).

Biyodizel üretiminde soya, pamuk, kolza, ayçiçeği ve aspir gibi bitkiler kullanılmaktadır (Işık vd. 2016, Şimşek 2024). Aspir, kuraklığa karşı dayanıklı ve %20-25 oranında yağ içeren bir bitkidir. Aspir bitkisi %90-93 oranında doymamış yağ asidi içermektedir. Aspir bitkisinin renkli çiçekleri boya (gıda ve kumaş) için kullanılırken, yağı ise boya, sabun,

cila, vernik ve en önemlisi biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Aspir bitkisinin ülkemizdeki üretim miktarı dünyadaki üretime göre oldukça azdır. Buna rağmen, çok zor koşullarda bile yetişebilmesi, üretim maliyetlerinin düşük olması, yenilebilir yağ olarak ve en önemlisi biyodizel üretiminde kullanılabilmesi son zamanlarda ülkemizde aspir bitkisine olan ilginin artması sebep olmaktadır (Şahin 2017).

Biyodizel üretiminde seyreltme, mikro emülsiyon, proliz ve transesterifikasyon gibi yöntemler kullanılmaktadır (Abbaszaadeh vd. 2012). Bu metodlar arasında transesterifikasyon yaygın olarak kullanılmaktadır (Aksoy 2010). Transesterifikasyon alkoliz olarak da adlandırılmaktadır. Transesterifikasyon sıvı veya katı yağ trigliseritlerinin, sodyum hidroksit gibi bir katalizör varlığında bir alkolle reaksiyona girerek esterler ve gliserol oluşturmalarıdır (Ahmed 2015). Transesterifikasyon sürecinde geleneksel ısıtma yaygın olarak kullanılmaktadır (Motasemi ve Ani 2012). Bu yöntemde, bir elektrikli ısıtıcı ve bir elektrik motoru kullanılarak reaktantların ısıtılması ve karıştırılması sağlanmaktadır (Kapılan ve Baykov 2014). Geleneksel ısıtmada ısı enerjisi reaktör yüzeyinden konveksiyon, iletim ve radyasyon yoluyla karışımına aktarıldığı için büyük miktarda enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (Motasemi ve Ani 2012). Bu yüzden geleneksel ısıtma ile biyodizel üretimi daha uzun reaksiyon süresi gerektirmektedir. Biyodizel üretiminde geleneksel ısıtmaya alternatif olarak süperkritik akışkan, mikrodalga ışınlama ve ultrasonik dalga gibi yeni teknolojiler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında mikrodalga ışınlama ile biyodizel üretimi ön plana çıkmaktadır (Allami vd. 2019). Mikrodalga ışınlamasında enerji doğrudan reaktantlara iletilmekte ve ısı transferi geleneksel ısıtmaya göre daha etkili olmaktadır. Bu yüzden reaksiyon daha kısa sürede tamamlanmaktadır (Motasemi ve Ani 2012).

Bu çalışmada, aspir yağından biyodizel üretiminde mikrodalga destekli transesterifikasyon metodu kullanılmıştır. Biyodizel üretimi ev tipi mikrodalga modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Dizel yakıtı ile üretilen biyodizel %15 oranında karıştırılmış, B15 yakıtı elde edilmiştir. B15 yakıtının motor performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkisi, dört zamanlı, su soğutmalı ve tek silindirli bir dizel motorunda incelenmiştir.

2. YAĞLAR VE BİODİZEL ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1 Yağlar ve Aspir Bitkisi

Bitkisel ve hayvansal yağlar olarak ikiye ayrılan yağlar, A,D,E,K gibi vitaminleri ve esansiyel yağ asitlerini içermektedir. Günümüzde, pahalı olması, imalat güçlüğü ve doymuş yağ içeriğinin yüksek olması gibi nedenlerde hayvansal yağlar yerine bitkisel yağların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Gıda sektöründe yağ ihtiyacının büyük bir bölümü bitkisel yağlardan karşılanmaktadır. Bitkisel yağlar kolza, ayçiçek ve aspir gibi yağlı tohum bitkileri dışında palm, hindistan cevizi ve zeytin gibi meyvelerden elde edilmektedir (Soylu Erşahin 2018).

Ülkemizde, yağlı tohum bitkisi üretimi yaklaşık olarak 3 milyon ton (Mton) kadardır. Ülkemizde yağlı tohum bitkisi üretimin büyük bir bölümünü (%88) pamuk ve ayçiçeği bitkileri oluşturmaktadır. Bu yağlı tohum bitkileri dışında soya fasulyesi, kolza, yer fıstığı, aspir ve susam üretimi yapılmaktadır (Soylu Erşahin 2018).

Aspir, *Carthamus tinctorius L.*, Compositae veya Asteraceae familyasının bir üyesidir. Anavatanı Akdeniz Bölgesi, Asya ve Afrika olan aspir bitkisinin doğal yaşam alanı Orta Hindistan'dan, Nil Nehri ve Etiyopya üzerinden Orta Doğu'ya kadar uzanmaktadır. Aspir bitkisinin boyu 40-100 cm arasında olup, boyu 1 metreye kadar çıkmaktadır. Aspir bitkileri esas olarak çeşitli ikincil dallarla biten sert ve dallanmış gövdelerden oluşur. Sapları silindirik, grimsi yeşil ve yapraklıdır. Bu bitki sapsız, dikdörtgen-mızrak şeklinde, kenarları ve sivri ucu olan yaprak şekline sahiptir. Alt yapraklar genellikle daha uzun iken, üst yapraklar ise daha küçük olabilir (Korkmaz 2020). Aspir bitkisi üretiminin temel nedenleri tohumlarının yağ ve kuşyemi olarak kullanılmasıdır. Ayrıca giyim, gıda ve ilaç sektörlerinde aspir bitkisinin çiçek kısımları renklendirici olarak kullanılmaktadır (Ahmed 2015, Korkmaz 2020).

Aspir bitkisi her yıl veya kış aylarında yetişen dallı, dikenli otsu bir bitkidir. Küre şeklindeki çiçek başları ve genellikle parlak sarı, turuncu veya kırmızı çiçeklerle örtülmüştür. Tek çekirdeğe sahip olan ve olgunlaştığında tohumu açacak özel bağlantı parçaları bulunmayan kuru meyve kısmı, düzgün ve dörtkenarlıdır (Korkmaz 2020).

Aspir bitkisinde beyaz kısım tohumları kırmızı kısım ise çiçekleri temsil etmektedir. Kuru ve zorlu iklimlere karşı dayanıklı olan aspir bitkisi, çimlenmenin ardından birkaç hafta rozet formunu korumakta ve daha sonra büyüme hızı artmaktadır. Çiçeklerde tozlaşma rüzgar, böcekler ve yağmur yoluyla yada kendi kendine gerçekleşebilir. Aspir tohumunun bileşiminin %13-46'sı yağ olup, bu yağın yaklaşık %90'ı doymamış yağ asitleri olan oleik ve linoleik asitten oluşmaktadır (Korkmaz 2020). Resim 2.1' de aspir bitkisi ve tohumları görülmektedir.



Resim 2.1 Aspir bitkisi ve tohumları (Korkmaz 2020).

2.2 Yakıt Olarak Yağların Kullanımı İçin Özelliklerinin İyileştirilmesi

Bitkisel yağların sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı ilk olarak 1900'lü yıllarda dizel motorların mucidi Rudolph Diesel tarafından gerçekleştirilmiştir. Yüksek viskoziteye sahip bitkisel yağların sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda doğrudan kullanımı çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bu problemleri çözmek için seyreltme, mikro emülsiyon, proliz ve transesterifikasyon gibi yöntemler kullanılmaktadır (Abbaszaadeh vd. 2012).

2.2.1 Seyreltme

Seyreltme; bitkisel ve atık yağların solvent veya dizel yakıtla belirli oranlarda karıştırılarak inceltilmesi işlemidir. Yağların dizel yakıtla karıştırılması oldukça yaygındır

ve böylece yağın viskozitesi azaltılmaktadır. Uygulamalarda yağların dizel yakıtlara karışım oranları B20, B30, B40, B50, B80 olarak ifade edilmektedir. Bu karışımlarda %20, %30, %40, %50 ve %80 oranında yağ (atık, bitkisel veya hayvansal) bulunmaktadır. Bu işlemde kolza yağı, yer fıstığı yağı, ayçiçek yağı ve atık yağlar kullanılmaktadır (Aktaş vd. 2021).

2.2.2 Mikroemülsiyon

Kısa zincirli alkoller (metanol, 1-bütanol veya etanol) kullanılarak bitkisel yağların viskozitesini azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Mikroemülsiyon, normalde birbiriyle karışmayan iki sıvı ve bir veya daha fazla aktif maddenin birleşiminden oluşan, boyutları 1 ila 50 nm arasında olan optik olarak izotropik sıvı mikro yapıların denge dağılımıdır (Aktaş vd. 2021). Mikro emülsiyon bazlı yakıtlar bazen "hibrit yakıtlar" olarak da adlandırılmaktadır. Mikroemülsiyonlar bir yağ fazı, bir sulu faz ve bir yüzey aktif madde olmak üzere üç bileşenli berrak, stabil izotropik sıvılardır. (Abbaszaadeh vd. 2012).

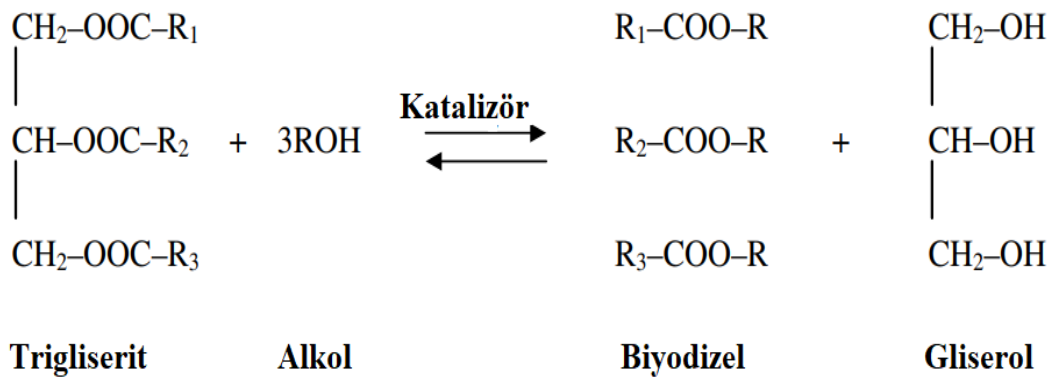
2.2.3 Piroliz

Piroliz inert veya oksijen bulunmayan bir ortamda organik maddelerin ısı uygulanarak sıvı, katı ve gaz ürünlere dönüştürülmesi işlemidir. Organik maddenin kimyasal yapısını bozarak yeni ürünlerin oluşumunu sağlayacak miktarda ısı sağlanmalıdır (Doğan 2012).

Piroliz işlemi yavaş, flaş ve hızlı olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Yavaş piroliz genellikle odun kömürü üretmek için kullanılmaktadır. Bu süreç uzun süreli gaz çıkışı, düşük ısıtma hızı ve düşük sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Yavaş pirolizde en yüksek sıcaklık 500 °C civarındadır. İşlem süresi (birkaç dakikadan bir güne) sonucunda katı, sıvı ve gaz fazında ürünler oluşmaktadır. Bu süreçte istenen ürün katı fazdadır. Flaş piroliz işlemi 450-600 °C sıcaklık aralığında oksijen bulunmayan bir ortamda biyokütlenin oldukça az bir sürede (birkaç saniye) gerçekleşmektedir. Bu piroliz yönteminde biyokütlenin parçacık boyutu oldukça küçük olmalıdır. Hızlı pirolizde ısıtma hızı yavaş ve flaş piroliz arasında olan hızlı pirolizde sıvı ürün üretimi amaçlanmaktadır. Akışkan yataklı reaktörler hızlı piroliz sürecinde avantajları dolayısı ile tercih edilmektedir (Andaç 2022).

2.2.4 Transesterifikasyon

Alkoliz olarak da adlandırılan transesterifikasyon, sıvı veya katı yağ trigliseritlerinin, sodyum hidroksit gibi bir katalizör varlığında bir alkolle reaksiyona girerek esterler ve gliserol oluşturmalarıdır. Şekil 2.1’de trigliseritlerin transesterifikasyon reaksiyonunu görülmektedir (Ahmed 2015). Katalizör genellikle reaksiyon hızını ve verimi artırmak için kullanılır. Transesterifikasyon reaksiyonu ters reaksiyon olduğundan, dengeyi ürünlere doğru kaydırmak için fazla alkol kullanılır (Demirbaş 2009, Ahmed 2015).



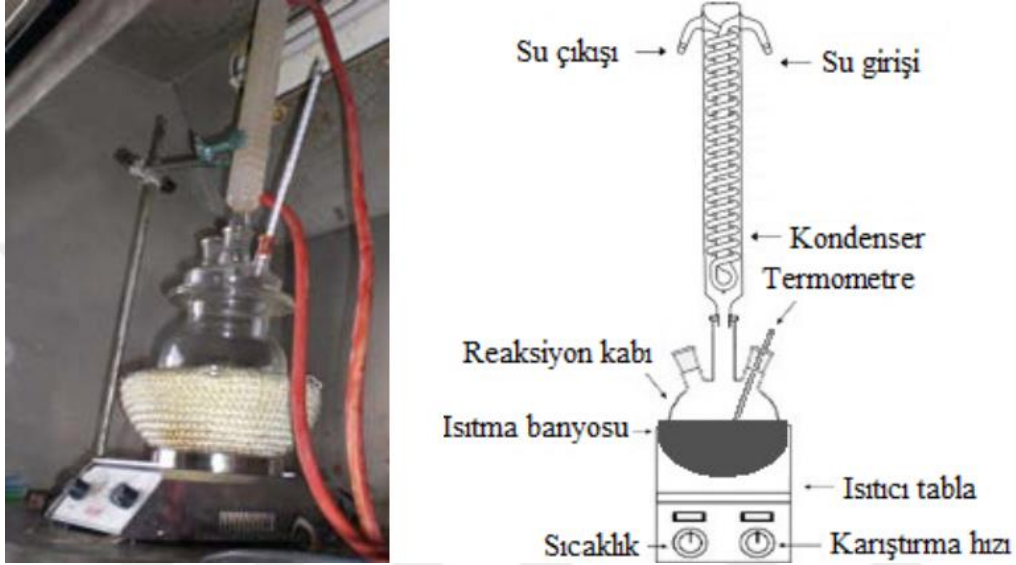
Şekil 2.1 Transesterifikasyon reaksiyonu (Demirbaş 2009, Ahmed 2015).

Reaksiyonda alkolün yağa molar stokiometrik oranı 3:1 dir. Fakat alkolün kaynama noktasının üzerindeki reaksiyonlarda daha fazla alkol reaksiyona ilave edilmektedir. Reaksiyonda kullanılacak alkol miktarı katalizör tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Transesterifikasyon reaksiyonu katalizörsüz ve katalizörlü olarak gerçekleşmektedir. Reaksiyonlarda asidik, alkali ve enzimatik katalizör kullanılmaktadır (Aksoy 2010).

Transesterifikasyon reaksiyonunda yağ türü, serbest yağ asidi içeriği, nem miktarı, katalizör türü, alkol yağ oranı, alkol türü, karıştırma hızı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi gibi parametreler verimi etkilemektedir (Topal 2014).

Transesterifikasyon yönteminde geleneksel biyodizel üretim süreci, yüksek güçlü geleneksel ısıtma ve mekanik karıştırmanın kullanımına dayanmaktadır. Geleneksel yöntemde, reaktantların ısıtılması ve karıştırılması için sırasıyla bir elektrikli ısıtıcı ve bir

elektrik motoru kullanılmaktadır. Geleneksel ısıtma, konveksiyon akımlarına ve reaksiyon karışımının termal iletkenliğine bağlıdır. Geleneksel biyodizel prosesleri yavaştır ve reaksiyon süresi bir saatten fazla olup, faz ayrımı 5 saatten daha uzun sürmektedir (Kapılan ve Baykov 2014). Şekil 2.2 geleneksel yöntem ile biyodizel üretimi görülmektedir.



Şekil 2.2 Geleneksel yöntem ile biyodizel üretimi (Demir 2018).

Transesterifikasyon işleminde yağa ısı enerjisinin aktarılmasında ve karıştırılmasında geleneksel ısıtmaya alternatif olarak süper kritik, mikrodalga ve ultrasonik gibi yöntemler uygulanmaktadır (Karakurt 2022, Söyler 2023).

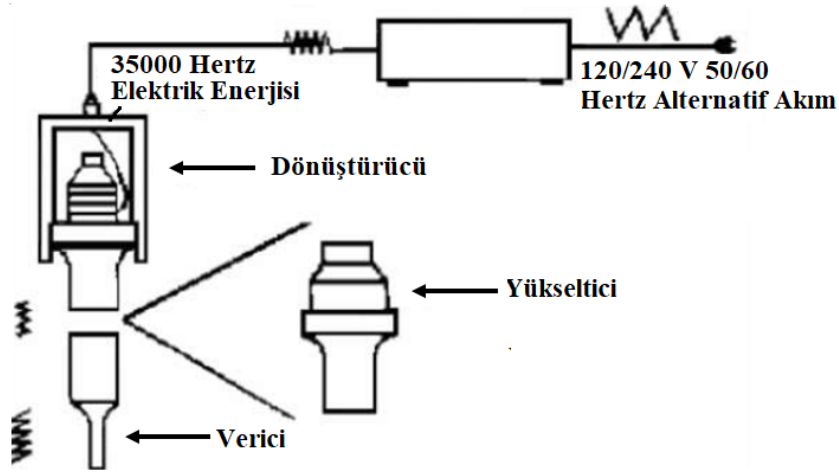
Süper kritik yöntemi ile biyodizel üretimi

Madde üç fazda bulunur ve tüm saf maddelerin sıcaklık ve basınç altında faz değişimlerinin görüldüğü diyagramlar mevcuttur. Saf maddeler için faz ayrımının meydana gelmediği nokta kritik nokta olarak tanımlanmaktadır. Kritik nokta üzerindeki saf madde süper kritik akışkan olarak adlandırılmaktadır. Çözme gücü, süper kritik alanda yoğunlukla doğru orantılı olarak değişmektedir. Süper kritik akışkanın özellikleri (viskozite, yoğunluk vb) maddenin sıvı ve gaz fazlarındaki özellikleri arasındadır (Yılmaz 2008).

Süper kritik alkollerle transesterifikasyon reaksiyonunda, etanol, metanol, 1-propanol, 1-butanol, 2-propanol, 1-heksanol ve 1-pentanol gibi alkoller kullanılmaktadır (Demir 2023). Bu alkoller arasında metanol ön plana çıkmaktadır. Süper kritik transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör kullanılmaması, reaksiyon hızının iyileşmesi, karıştırma işlemine gerek duyulmaması, reaksiyon süresinin kısalması ve üründen kolay ayrılması gibi avantajlara sahiptir (Yılmaz 2008, Demir 2023).

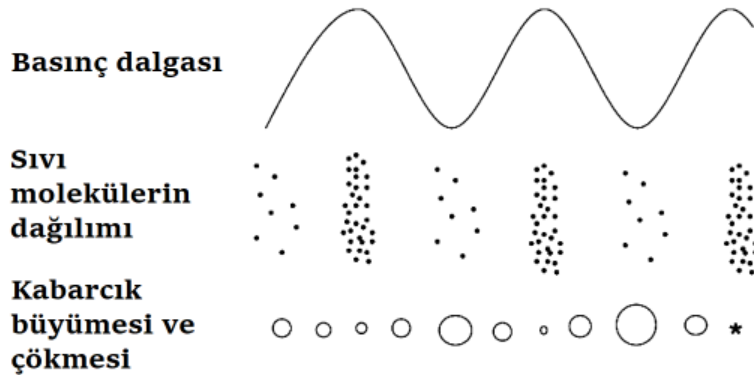
Ultrasonik yöntem ile biyodizel üretimi

Ultrasonik ses dalgalarının frekans aralığı 20 kHz-100 kHz iken, insan kulağı 16 Hz-18 kHz arasındaki sesleri işitmektedir. Endüstriyel amaçla kullanılan jeneratörlerin frekansı ise 20 kHz-120 kHz arasındadır. Bir dönüştürücü tarafından alınan yüksek frekansa sahip akım, mekanik titreşime dönüştürülür (Topal 2014). Şekil 2.3’de ultrasonik ses dalgasının oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.3 Ultrasonik ses dalgası (Topal 2014).

Ultrasonik cihazlar içerisindeki sıvıya ses dalgaları göndermektedir. Bu dalgalar sıvı molekülleri arasında gerilmeler meydana getirerek, sıvı içerisinde alçak ve yüksek basınç bölgeleri oluşturur. Bunun sonucunda sıvı içerisinde oluşan kabarcıklar ses dalgalarından aldıkları enerjiyi depo ederler. Kararlı olmayan bu kabarcıklar aniden büyüyerek patlar. Bu olaya kavitasyon denir. Kabarcıkların patlaması sonucunda güçlü bir enerji ortaya çıkar (Karakurt 2022). Şekil 2.4’de kavitasyon görülmektedir.



Şekil 2.4 Kavitasyon (Karakurt 2022).

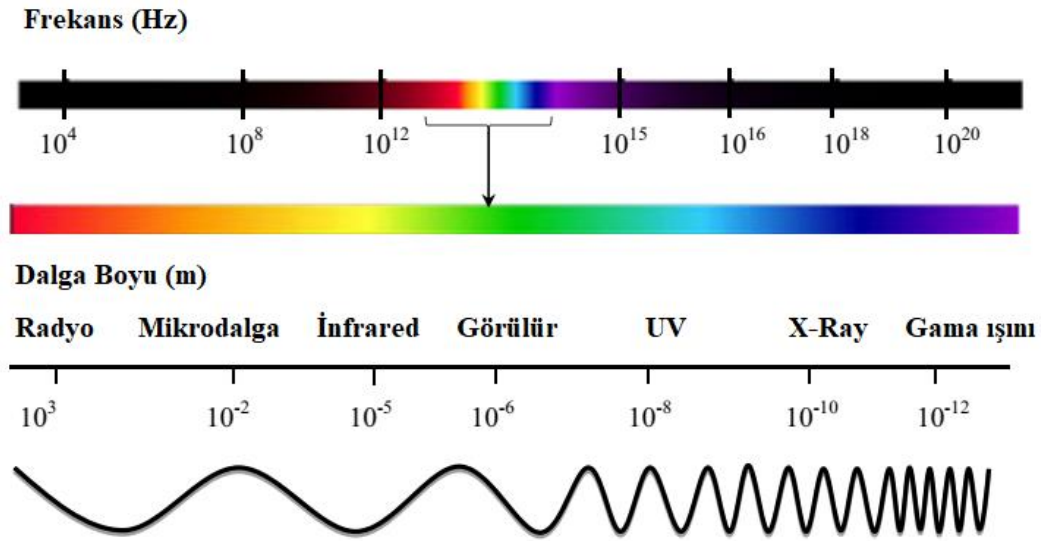
Her bir kabarcık anlık olarak çok yüksek basınç ve sıcaklıklar meydana getiren bir reaktör olarak düşünülebilir. Kabarcığın patlaması ile oluşan ısı enerjisi, kabarcığı çevreleyen sıvı tarafından absorbe edilerek, sıcaklıkta anlık değişimler meydana gelmez (Topal 2014, Karakurt 2022).

Ultrasonik yöntemle gerçekleşen transesterifikasyon reaksiyonunda verime güç, vuruş (pulse), frekans ve prob ucunun yerinden etkilenmektedir. Bu yöntem basit olması, asgari alkol/yağ oranı ihtiyacı, kısa reaksiyon süresi ve geleneksel yöntemle oranla daha az enerji tüketimi gibi avantajlara sahiptir (Topal 2014).

Mikrodalga yöntemi ile biyodizel üretimi

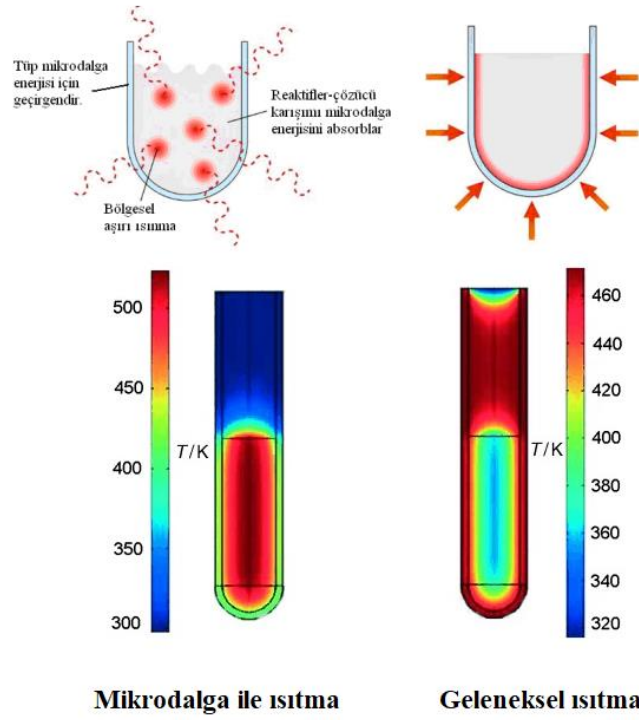
1970 li yıllarda yeni bir ısıtma teknolojisi olarak MW dielektrik ısıtma ortaya çıkmıştır. Mikrodalga teknolojisi zaman içerisinde kimyasal süreçleri hızlandırmak için güçlü bir araç haline gelmiştir (Rhithuparna vd. 2024).

Mikrodalgalar (MW), 0,3 ile 300 GHz arasındaki frekanslara bağlı olarak 1 mm ile 1 m arasında dalga boylarına sahiptir. Elektromanyetik radyasyon spektrumunda, mikrodalga radyasyon bölgesi kızılötesi radyasyon ve radyo dalgaları arasında yer almaktadır. Cep telefonu frekanslarına ve telekomünikasyona herhangi bir müdahaleyi önlemek amacıyla tüm ev tipi mikrodalga fırınlarda ve kimyasal sentezlerde 12,25 cm dalga boyuna karşılık gelen 2,45 GHz frekansı kullanılmaktadır (Sajjadi vd. 2014). Şekil 2.5’de elektromanyetik spektrum görülmektedir.



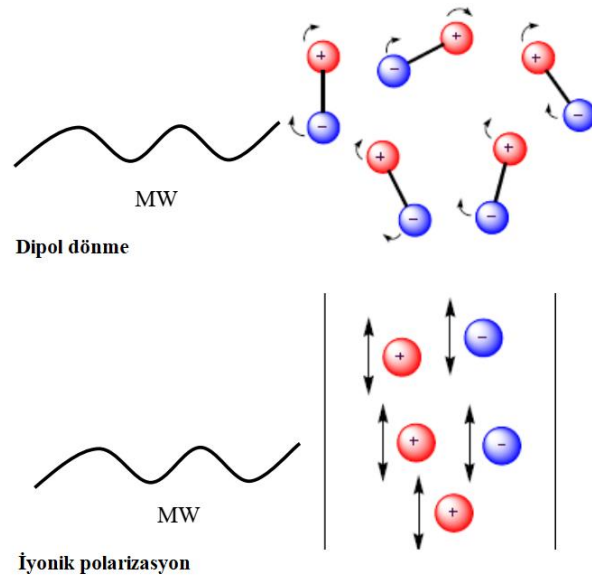
Şekil 2.5 Elektromanyetik spektrum (Sajjadi vd. 2014).

Geleneksel ısıtma yönteminde dışarıdan verilen ısı ilk önce reaksiyon kabına ve daha sonrada reaksiyon kabından reaksiyon kabı içerisindeki karışıma aktarılır (Özdemir 2008, Demir 2018). Harici ısı kaynağı (örneğin yağ banyosu) ile ısıtma gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, nüfuz edilmesi gereken çeşitli malzemelerin termal iletkenliğine bağlı olduğu için, sisteme enerji aktarımı nispeten yavaş ve verimsizdir. Buna karşılık, mikrodalga ışınlımla, mikrodalga enerjisinin reaksiyon karışımında mevcut olan moleküllerle (çözücüler, reaktifler, katalizörler) doğrudan birleştirilmesiyle verimli iç ısıtma (çekirdek içi hacimsel ısıtma) üretmektedir. Mikrodalga ısıtma geleneksel ısıtmayla karşılaştırıldığında ters bir sıcaklık gradyanı ortaya çıkar (Kappe 2004). Mikrodalga ile ısıtmada karışımın etkin bir şekilde karıştırılması sıcaklık farklarının oluşumunu engellemektedir (Özdemir 2008, Demir 2018). Şekil 2.6’da geleneksel ve mikrodalga ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Mikrodalga ısıtmada aynı anda tüm hacmin sıcaklığı yükselmektedir. Ancak yağ banyosu kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel ısıtmada önce kap duvarı ile temas halindeki karışımın sıcaklığı yükselmektedir.



Şekil 2.6 Geleneksel ve mikrodalga ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılması (Özdemir 2008).

Mikrodalgada dipol dönme ve iyonik polarizasyon olmak üzere iki adet ısı oluşum mekanizması bulunmaktadır. Dielektrik materyaller kalıcı yada indüklenmiş dipoller içerir. Polarizasyon mekanizmasında, bir dipol dış elektrik alanlarına duyarlıdır ve dönme yoluyla kendisini alanla aynı hizaya getirmeye çalışmaktadır. Yüksek frekanslı bir elektrik alanı altında, dipollerin salınım alanına tepki vermek için yeterli zamanı yoktur ve faz farkı oluşur. Bu faz farkı sonucunda alanı takip etmeye çalıştıklarında birbirleriyle çarpışırlar ve malzemede ısı üretmek için güç harcanır. Bu durum su ve diğer polar malzemeler için de geçerlidir. Dipolar polarizasyon mekanizması, elektriksel olarak yalıtkan malzemelerin dielektrik kaybıyla ısıtılmasını içeren mikrodalga dielektrik ısıtmanın temel prensibidir. (Sun vd. 2016). Bu faz farkı sonucunda oluşan moleküler sürtünme ve çarpışma enerji kaybına yol açar. Bunun sonucunda dielektrik ısı yükselir. Mikrodalgada iyonik polarizasyonda ısıtma şekli iletimle gerçekleşmektedir. İyon yada elektronlar değişen elektrik alanı ile etkileşirler. Böylece elektrik alanı doğrultusunda çözelti içerisinde baştanbaşa hareket ederek, sürtünme kaybı nedeniyle ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır (Ergan 2013, Demir 2018). Şekil 2.7’de mikrodalga ısıtma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 2.7 Mikrodalga ısıtma mekanizmaları (Ergan 2013).

3. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bitkisel yağlardan mikrodalga ısıtma kullanılarak biyodizel üretimi ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Azcan ve Danışman (2007) tarafından yapılan çalışmada pamuk yağından mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonu metanol ve KOH (potasyum hidroksit) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu katalizör miktarı, reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi parametreler için optimize edilmiştir. Isıtma sistemlerinin karşılaştırılması için geleneksel ısıtmada kullanılmıştır. Mikrodalga ısıtma için 7 dk reaksiyon süresi, %1,5 katalizör-yag oranı ve 333 K sıcaklık için biyodizel verimi %92,4 olarak elde edilmiştir. Geleneksel ısıtmada 30 dakika reaksiyon süresi, 333 K sıcaklık ve %1,5 katalizör-yag oranında biyodizel verimi %91,4 olarak belirlenmiştir. Mikrodalga ısıtmanın kullanılması ile reaksiyon süresinin etkili bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Azcan ve Danışman 2007).

Azcan ve Danışman (2008), yüksek yağ içeriğine sahip kanola yağından mikrodalga ısıtma kullanarak transesterifikasyon reaksiyonu gerçekleştirmiştir. Deneyler sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) olmak üzere iki farklı alkali katalizör varlığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde reaksiyon sıcaklığı, katalizör oranı ve süresi gibi reaksiyon parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Her iki katalizör için katalizör yağ oranı %1 olarak belirlenmiştir. Katalizör olarak KOH kullanıldığında 5 dk reaksiyon süresi ve 323 K sıcaklık optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Bu reaksiyon koşullarında biyodizel verimi ve ester içeriği sırası ile %93,7 ve %97,8 elde edilmiştir. NAOH için ise 3 dk reaksiyon süresi ve 313 K sıcaklık optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında biyodizel verimi ve ester içeriği sırası ile %92,7 ve %97,8 elde edilmiştir. Mikrodalga ısıtma kullanılarak biyodizel üretiminin verimi etkili bir şekilde arttırdığı ve reaksiyon süresini belirgin bir şekilde azalttığı gözlenmiştir (Azcan ve Danışman 2008).

Lertsathapornsuk vd. (2008), atık kızartma palmye yağının sürekli transesterifikasyonu için 800 W gücünde ev tipi bir mikrodalga fırını modifiye ederek bir biyodizel reaktörü

üretmişlerdir. Atık kızartma palm yağının etil estere sürekli dönüşüm verimi 12:1 etanol:yağ molar oranı, %3 NaOH (etanol içinde) ve 30 saniyelik mikrodalgada kalış süresinde %97'nin üzerinde elde edilmiştir. B100 (% biyodizel), B50 (%50 biyodizel+%50 dizel) yakıtları 100 kW'lık bir dizel jeneratörde 0 kW ila 75 kW (25 kW aralıklarla) arasında değişen motor yüklerinde dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Ortalama özgül yakıt tüketimi dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında B100 ve B50 yakıtları için sırasıyla %12,73 ve %5,60 artış gözlenmiştir. 50 kW motor yükünde B100 ve B50 yakıtları için motor verimliliği dizel yakıtına göre sırasıyla %0,26 ve %0,24 oranında daha düşük elde edilmiştir. B100 ve B50 yakıtları için CO emisyonları, dizel yakıtına göre sırasıyla %18 ve %14 oranında daha az elde edilmiştir. NO_x emisyonlarında her iki yakıt için tüm motor yüklerinde artışlar görülmüştür (Lertsathapornsuk vd. 2008)

Yusoff vd. (2022), hacimsel olarak %50 atık yemeklik yağ, %15 *Jatropha curcas* yağı ve %35 palm yağı içeren yağdan modifiye edilmiş mikrodalga ile biyodizel üretimi metanol ve potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Biyodizel verimini etkileyen parametreler, yanıt yüzeyi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma koşulları ağırlıkça %0,78 katalizör konsantrasyonu, 9,86:1 metanol/yağ molar oranı, 10,5 dk reaksiyon süresi ve 478 d/d karıştırma hızı olarak optimize edilmiştir. Bu koşullarda, tahmin edilen ve deneysel dönüşüm verimleri sırasıyla %96,81 ve %96,91 olarak elde edilmiştir (Yusoff vd. 2022).

Hsiao vd. (2010), soya fasulyesi yağından transesterifikasyon reaksiyonu ultrasonik karıştırma ve kapalı mikrodalga ışınlaması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optimum biyodizel dönüşüm oranı reaksiyon sıcaklığı, katalizör miktarı ve metanol/yağ molar oranı gibi farklı reaksiyon koşulları için incelenmiştir. Ultrasonik karıştırma ve kapalı mikrodalga ışınlama kullanım süreleri incelenmiş ve optimum süreler sırasıyla 1 dk ve 2 dk olarak belirlenmiştir. Biyodizelin optimum dönüşüm verimi ağırlıkça %1,0 katalizör (NaOH) oranı, 333 K reaksiyon sıcaklığı ve 6:1 metanol/yağ molar oranında %97,7 olarak belirlenmiştir (Hsiao vd. 2010).

Düz vd. (2011), Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, Diyarbakır'da yetişen aspir tohumlarından biyodizel üretimi mikrodalga ısıtma ile gerçekleştirilmiştir. Biyodizelin

optimum dönüşüm verimi, %1 NaOH katalizör konsantrasyonunda, 10:1 metanol/yağ molar oranında ve 6 dk reaksiyon süresinde %98,4 olarak elde edilmiştir. Aspir yağı ve biyodizelin yoğunluk, kinematik viskozite, parlama noktası, nötralizasyon sayısı, iyot sayısı, akma noktası, setan sayısı, bulutlanma noktası, gibi önemli yakıt özellikleri belirlenmiştir. Geleneksel ısıtma yöntemiyle karşılaştırıldığında, mikrodalga ısıtımının kullanıldığı sürecin daha hızlı bir yöntem olduğu ve yüksek biyodizel verimi elde edildiği belirlenmiştir (Düz vd. 2011).

Chen vd. (2012), atık kızartma yağından mikrodalga ısıtma ile biyodizel üretiminde katalizör tipinin, katalizör miktarının, reaksiyon süresinin, metanolün yağ molar oranının ve mikrodalga gücünün etkilerini incelemiştir. Katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metoksit (CH_3ONa) kullanılmıştır. Sodyum metoksit (CH_3ONa) katalizörünün biyodizel verimi sodyum hidroksit (NaOH) katalizöründen daha yüksek elde edildiği için katalizör olarak sodyum metoksit (CH_3ONa) kullanılmıştır. Geleneksel ısıtma ile 65 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 metanol/yağ molar oranı, ağırlıkça %0,75 sodyum metoksit (CH_3ONa) katalizör oranı ve 90 dk reaksiyon süresinde optimum dönüşüm verimi %96,6 olarak elde edilmiştir. Mikrodalga ısıtma ile optimum dönüşüm verimi ise 750 W mikrodalga gücü, 6:1 metanol/yağ molar oranı, ağırlıkça %0,75 sodyum metoksit (CH_3ONa) katalizör oranı ve 3 dk reaksiyon süresinde %97,9 olarak elde edilmiştir. Deneyler sonucunda mikrodalga ısıtmanın kullanılmasıyla reaksiyon süresi önemli ölçüde azalma ve biyodizel veriminde artış gözlenmiştir (Chen vd. 2012).

Lin vd. (2012), palm yağından mikrodalga ısıtma ile biyodizel üretiminde katalizör tipinin, katalizör miktarının, reaksiyon süresinin, metanolün yağ molar oranının ve mikrodalga gücünün etkilerini incelemiştir. Katalizör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metoksit (CH_3ONa) kullanılmıştır. Mikrodalga ısıtma ile optimum reaksiyon koşulları 750 W mikrodalga gücü, 6:1 metanol/yağ molar oranı ve 3 dk reaksiyon süresi ve %0,75 katalizör (NaOH ve CH_3ONa) yağ oranı olarak belirlenmiştir. Mikrodalga ile optimum biyodizel dönüşüm verimleri sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum metoksit (CH_3ONa) katalizörleri için sırası ile %99 ve %99,5 olarak elde edilmiştir. Sodyum metoksit (CH_3ONa) verimi daha yüksek elde edildiği için katalizör olarak tercih edilmiştir. Geleneksel ısıtma ile 65 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 metanol/yağ molar oranı,

ağırlıkça %0,75 sodyum metoksit (CH_3ONa) katalizör oranı ve 90 dk reaksiyon süresinde optimum dönüşüm verimi %98,3 olarak elde edilmiştir. Geleneksel ve mikrodalga ısıtma ile toplam enerji tüketimleri optimum koşullarda sırasıyla 1100 kJ ve 486 kJ olarak hesaplanmıştır (Lin vd. 2014).

Milano vd. (2018) mikrodalga destekli transesterifikasyonu %70 atık kızartma yağı ve %30 tamanu yağı karışımı ile gerçekleştirilmiştir. Biyodizel verimini, metanol/yağ oranı, katalizör konsantrasyonu, karıştırma hızı ve reaksiyon süresi koşulları için ikinci dereceden yanıt yüzey metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Bu model ile optimum biyodizel verimi %59,60 hacimsel metanol/yağ oranı, ağırlıkça %0,774 katalizör konsantrasyonu, 600 d/d karıştırma hızı ve 7,15 dk reaksiyon süresi koşullarında %97,40 olarak tahmin edilmiştir. Bu reaksiyon koşullarında üretilen biyodizelin verimi %97,65 olarak bulunmuştur. Deneysel ve tahmin edilen veriler arasında mükemmel bir uyum olduğu belirlenmiştir. Biyodizelin fizikokimyasal özellikleri ölçülmüş ve üretilen biyodizelin, atık yemeklik yağ biyodizeline göre daha yüksek oksidasyon stabilitesine sahip olduğu bulunmuştur. Mikrodalga destekli transesterifikasyon toplam reaksiyon süresinin (9,15 dk) geleneksel transesterifikasyon reaksiyon süresine (82,15 dk) göre daha kısa olduğu belirlenmiştir (Milano vd. 2018).

Allami vd (2019), hurma çekirdeği yağından mikrodalga ısıtma ile biyodizel üretim sürecinin optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Mikrodalga ısıtma ve geleneksel ısıtma ile üretilen biyodizelin motor performans ve emisyonlarına etkisini incelemiştir. Geleneksel yöntem için 60°C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 metanol/yağ molar oranı, ağırlıkça %1 katalizör oranı ve 90 dakikalık reaksiyon süresi koşullarında %96,4'lük bir biyodizel verimi elde edilmiştir. Mikrodalga ısıtma ile biyodizel verimi ise 270 W mikrodalga gücü, 6:1 metanol/yağ molar oranı, %1 katalizör oranı ve 2,5 dk reaksiyon süresinde %97,9 olarak elde edilmiştir. Geleneksel ısıtma ile üretilen biyodizelin motor gücü ve momenti mikrodalga ısıtma ile üretilen biyodizele göre daha yüksek elde edilirken, özgül yakıt tüketimi ise daha düşük elde edilmiştir. Mikrodalga ısıtma ile üretilen yakıt, geleneksel ısıtma ile üretilen yakıtla karşılaştırıldığında CO ve HC emisyonlarında belirgin bir şekilde azalma görülürken, NO_x emisyonunda önemsiz miktarda artış gözlenmiştir.

Ali vd. (2020), tarafından mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonu, atık kızartma yağı ve kireçtaşı bazlı katalizör kullanılarak yanıt yüzey metodu ile optimize edilmiştir. Biyodizelin ortalama optimum dönüşüm verimi, 65°C reaksiyon sıcaklığı, 900 W mikrodalga gücü, ağırlıkça %5,47 katalizör oranı, 12,21:1 metanol/yağ molar oranı ve 55,26 dakikalık reaksiyon süresinde %96,65 olarak elde edilmiştir. Yanıt yüzey metodu ile ortalama optimum dönüşüm verimi %97,11 olarak belirlenmiştir. Deneysel ve modelden elde edilen verilen arasında %0,84 fark olduğu görülmüştür. Geleneksel bir reaktör için gereken reaksiyon süresine göre yaklaşık %77 oranında azalma gözlenmiştir. Biyodizel kullanımı ile dizel yakıtına göre partikül madde ve NO_x emisyonunları sırasıyla %21,7 ve %7,8 oranında azalma elde edilmiştir.

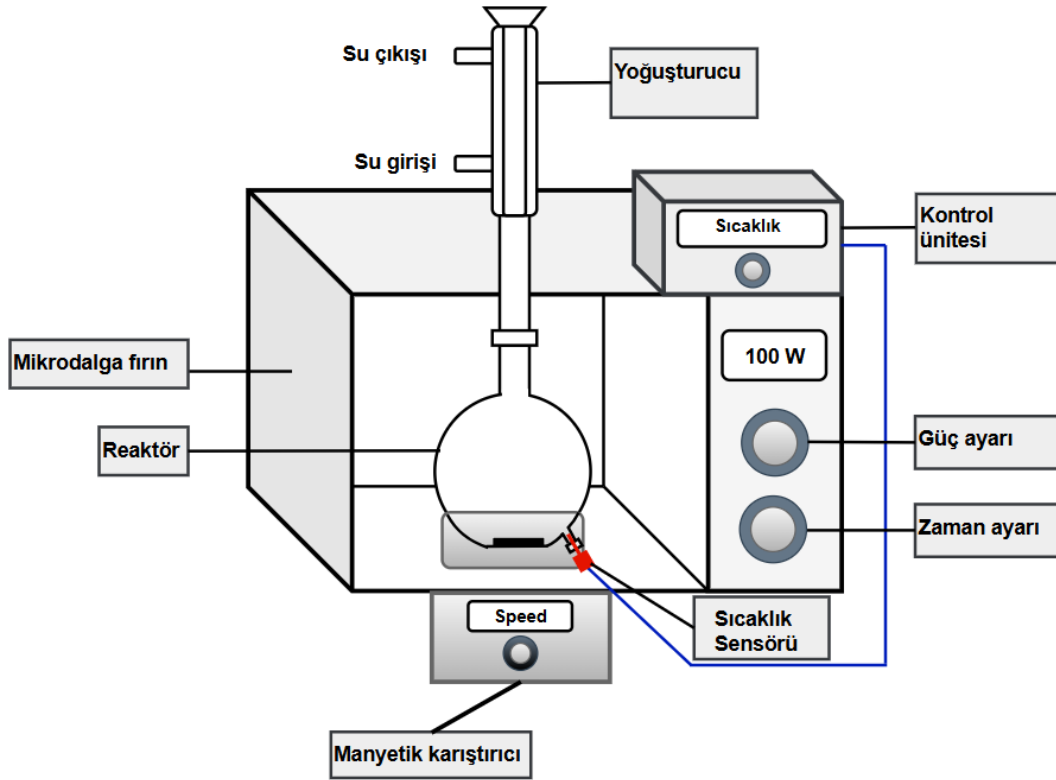
Akhtar vd. (2023), yenilebilir olmayan tespih ağacı tohum yağı ile mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonunda katalizör konsantrasyonu, metanol-yağ oranı, reaksiyon hızı ve reaksiyon süresi gibi çalışma parametrelerini optimize edilmiştir. Deneysel çalışmada maksimum biyodizel verimi, ağırlıkça %1,5 katalizör konsantrasyonu, hacimce 6:1 metanol-yağ oranı, 400 d/d reaksiyon hızı ve 3 dk reaksiyon süresinde %95 olarak belirlenmiştir. Çeşitli çalışma parametrelerinin biyodizel verimi üzerindeki etkileri yanıt yüzey metodu ve yapay sinir ağı kullanılarak incelenmiştir. Yapay sinir ağları ile biyodizel verimi tahminindeki iyileşme yüzdesi, yanıt yüzey metodu ile karşılaştırıldığında %12 olarak bulunmuştur (Akhtar vd. 2023).

4. MATERYAL VE METOT

4.1 Biyodizel Üretimi

Bu çalışmada mikrodalga destekli transesterifikasyon yöntemi ile aspir yağından biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada katalizör olarak NaOH (sodyum hidroksit) ve alkol olarak CH₃OH (metil alkol) kullanılmıştır.

Biyodizel üretimi mikrodalga destekli transesterifikasyon metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler 100-800 W çıkış gücünde ve 2450 Mhz çalışma frekansında Samsung ME711K marka ev tipi mikrodalga modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Modifiye edilmiş mikrodalga cihazına reaksiyon sırasında buharlaşan metanolün yoğunlaşmasını sağlayan su soğutmalı bir yoğusturucu ilave edilmiştir. Reaksiyon 250 ml hacminde düztabanlı bir cam flask (reaktör) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga cihazının alt kısmına harici bir manyetik karıştırıcı ve sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Şekil 4.1 de modifiye edilmiş mikrodalga sistemi görülmektedir.



Şekil 4.1 Biyodizel üretiminde kullanılan deney düzeneği.

Aspir yağından mikrodalga destekli biyodizel üretimi %0,75 ağırlıkça yağ/katalizör oranı, ağırlıkça %25 alkol/yağ oranı, 55 °C rekasiyon sıcaklığı, 100 W mikrodalga çıkış gücü, 500 d/d karıştırma hızı ve 15 dk reaksiyon süresinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtların oranları D100 (%100 dizel yakıtı) ve B15 (%85 dizel yakıtı + %15 biyodizel) olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan yakıtları bazı özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Yakıt özellikleri.

Yakıt Türü	Kinematik viskozite (mm ² /s, 40 °C)	Parlama Noktası (°C)	Su (ppm)	Yoğunluk (kg/m ³ , 15°C)	Isıl Değer (kJ/kg)
Dizel	3,09	60	33	831,88	44891
B15	3,34	65	101	841,23	44110

4.2 Deney Verilerinin Analizi

Özgül yakıt tüketimi Eş. 4.1 kullanılarak belirlenmiştir (Heywood 1988, Uyumaz 2014, Opuz 2022).

$$\dot{m}_y = \frac{\dot{m}_y}{P_e} \quad (4.1)$$

Eş. 4.2 kullanılarak ısı verim hesaplanmıştır (Heywood 1988, Uyumaz 2014, Opuz 2022).

$$\eta_T = \frac{W_{net}}{\dot{m} Q_{LHV}} \quad (4.2)$$

Silindir içi basınç verileri 0,36° krank açısı aralıklarla alınmaktadır. Bu veriler dijital sinyallere dönüştürülmekte ve ısı dağılımının belirlenmesi sırasında yapılan hesaplamalarda gürültünün meydana geldiği belirlenmektedir. Silindir içi basınç verileri Taylor serisi formatında 4. seriye açılarak filtreleme gerçekleştirilmekte ve basınç sinyallerindeki gürültü engellenmektedir. Eş. 4.3’de filtreleme işleminde kullanılan ifade görülmektedir (Can 2012, Uyumaz 2014, Opuz 2022).

$$P_i = \frac{1}{x^2} \left[P_{i-(x-1)} + 2P_{i-(x-2)} + 3P_{i-(x-3)} + \dots + xP_i + \dots + 3P_{i+(x-3)} + 2P_{i+(x-2)} + P_{i+(x-1)} \right] \quad (4.3)$$

Eş. 4.4 ile indike ortalama efektif basınç hesaplanmıştır (Stone 1999, Uyumaz 2014, Calam 2015, Opuz 2022).

$$imep = \frac{W_{net}}{V_{kurs}} \quad (4.4)$$

Eş. 4.5 ile net iş hesaplanmaktadır (Heywood 1988, Uyumaz 2014, Calam 2015, Opuz 2022).

$$W_{net} = \int P dV \quad (4.5)$$

Isı dağılım oranı Eş. 4.6'da açık sistemler için termodinamiğin birinci kanunu kullanılarak hesaplanmaktadır (Heywood 1988, Uyumaz 2014, Calam 2015, Opuz 2022).

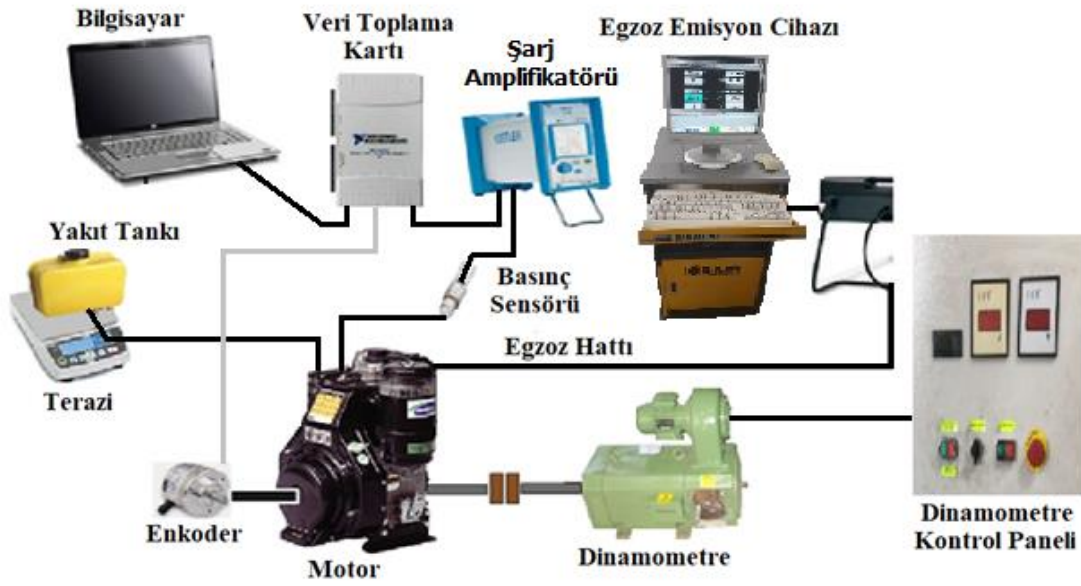
$$\frac{dQ_{gr}}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta} \quad (4.6)$$

Eş. 4.6'da $\frac{dQ_{heat}}{d\theta}$, $\frac{dQ_{gr}}{d\theta}$, V , P , $\frac{dP}{d\theta}$ ve $\frac{dV}{d\theta}$ sırası ile silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı (J), toplam ısı dağılımını (J), silindir hacmini (m^3), ölçülen silindir basıncını (Pa), silindir basıncının krank mili açısına göre türevini (Pa/°KA), silindir hacminin krank mili açısına göre türevini ($m^3/°KA$) göstermektedir. Eş. 4.7 kullanılarak ısı transfer oranı hesaplanmaktadır (Heywood 1988, Stone 1999, Uyumaz 2014, Calam 2015, Opuz 2022).

$$\frac{dQ_{heat}}{d\theta} = A_2 h_c (T_g - T_w) \quad (4.7)$$

4.3 Motor Test Düzenegi

Motor performans testleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Deney düzenegi, dinamometre, dinamometre kontrol paneli, test motoru, egzoz emisyon cihazı, terazi, yakıt tankı, enkoder, basınç sensörü, şarj amplifikatörü ve veri toplama kartından oluşmaktadır. Şekil 4.2'de deney düzenegi görülmektedir.



Şekil 4.2 Deney düzeneği.

4.3.1 Test motoru

Deneylerde tek silindirli, su soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu Antor marka motor kullanılmıştır. Test motorunun resmi ve özellikleri sırası ile Resim 4.1 ve Çizelge 4.2’de görülmektedir.



Resim 4.1 Test motoru.

Çizelge 4.2 Motorun özellikleri.

Motor Parametreleri	Özellik
Marka	Antor AD510 BS
Soğutma Sistemi	Su
Silindir sayısı	1
Silindir hacmi	510 cm ³
Silindir Çapı	85 mm
Kurs	90 mm
Sıkıştırma oranı	17,5:1
Maksimum Tork	32,8 Nm / 1800 d/d
Motor Gücü	12 BG / 1800 d/d

4.3.2 Egzoz gaz analizörü

Deneysel çalışmada egzoz emisyon analizörü olarak Bilsa MOD 2210 WIN-XP marka cihaz kullanılmıştır. Emisyon cihazı ile CO (%), O₂ (%), HC (ppm), CO₂ (%), lambda ve NO_x (ppm) emisyonlarının ölçümleri yapılabilmektedir. Resim 4.2’de Bilsa MOD 2210 WIN-XP emisyon cihazının resmi görülmektedir.



Resim 4.2 Bilsa MOD 2210 WIN-XP emisyon cihazı

4.3.3 Basınç sensörü

AVL QC34C marka 69 kHz doğal frekansında, 0-250 bar aralığında 19 pC/bar ve +/- %0,2 hassasiyetinde ölçüm yapabilen, su soğutmalı basınç sensörü kullanılmıştır. Su soğutma sisteminde oluşabilecek arıza durumlarında basınç sensörü 350 °C sıcaklıklara kadar dayanabilmektedir. Resim 4.3’de basınç sensörü görülmektedir.



Resim 4.3 Basınç sensörü.

4.3.4 Şarj amplifikatörü

Basınç sensöründen gelen şarj sinyalini orantılı bir çıkış voltajına dönüştürmek için Kistler 5018A şarj amplifikatörü kullanılmıştır. Resim 4.4’de şarj amplifikatörü görülmektedir.



Resim 4.4 Şarj amplifikatörü.

4.3.5 Veri toplama kartı

Ölçülen fiziksel büyüklüklerin sayısal bir biçime dönüştürülerek bilgisayara aktarılması veri toplama olarak ifade edilmektedir (Boru 2012). Deneylerde National Instrument USB-6351 model veri toplama kartı kullanılmıştır. Resim 4.5’de veri toplama kartı görülmektedir.



Resim 4.5 Veri toplama kartı.

4.3.6 Enkoder

Krank açısı verileri Opkon marka ve PRI 50AR8 model enkoder kullanılarak ölçülmüştür. Enkoder Resim 4.6’da görülmektedir.



Resim 4.6 Enkoder.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

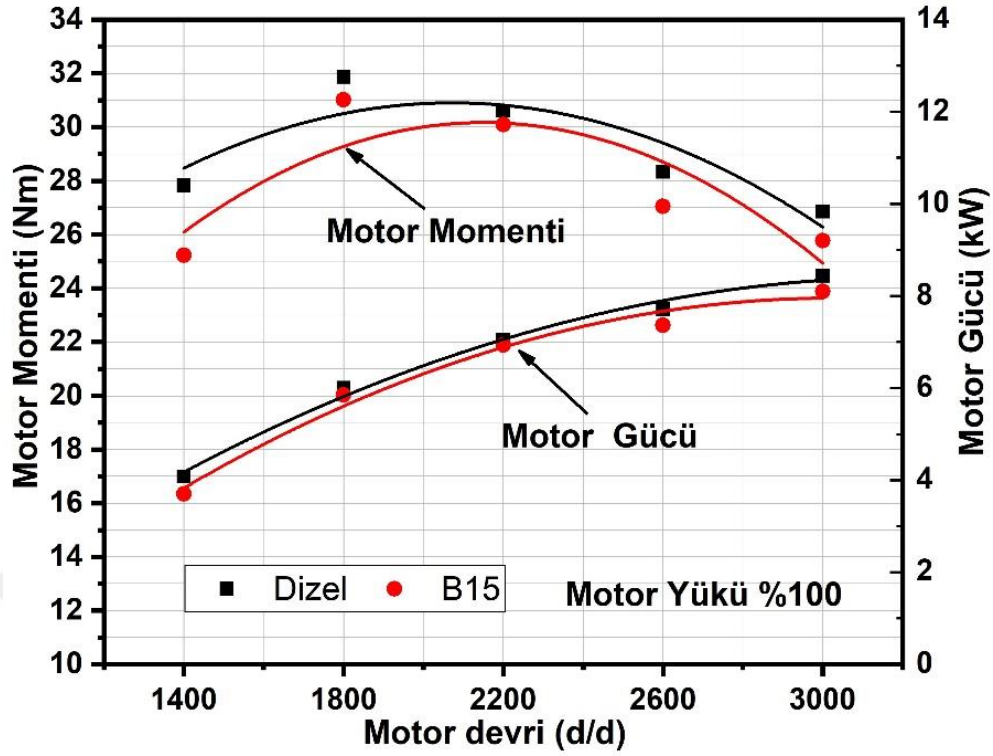
Aspir yağından mikrodalga destekli transesterifikasyon metodu kullanılarak biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. B15 yakıtının motor performans, yanma ve emisyon karakteristikleri dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır.

5.1 Motor Performansı

Motor gücü, motor momenti, özgül yakıt tüketimi ve efektif verim parametreleri dizel ve B15 yakıtları için tam yükte ve motor devrine bağlı olarak incelenmiştir.

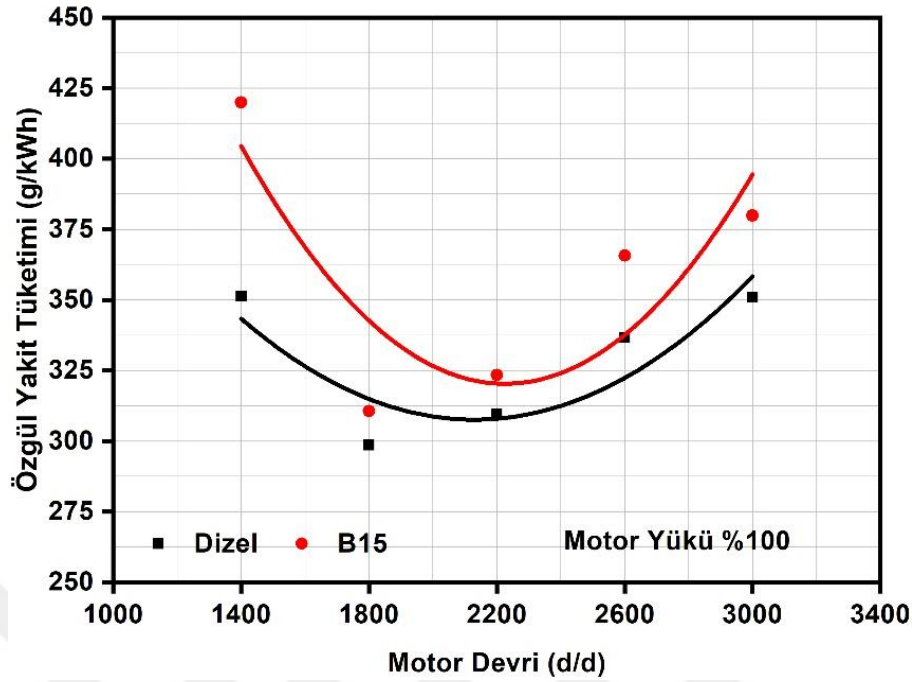
Dizel ve B15 yakıtları kullanımının motor momenti ve motor gücü üzerindeki etkileri motor devrine bağlı olarak Şekil 5.1’de görülmektedir. Motor devrinin artması ile motor gücüde artmaktadır. Yüksek motor devirlerinde, silindir içerisine alınacak hava için yeterli zaman bulunmaması nedeniyle yakıt molekülleri oksidasyonunu tamamlayamamakta ve güç azalma eğilimine girmektedir. Dizel yakıtı ile B15 yakıtına göre tüm motor devirlerinde daha fazla motor gücünün elde edildiği gözlenmiştir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre motor gücünde ortalama olarak %4,05 azalma elde edilmiştir. Biyodizelin viskozite ve yoğunluğu dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bu nedenle atomizasyon, buharlaşma ve hava-yakıt karışımı gibi süreçler olumsuz etkilenmekte ve dizel yakıtına göre motor gücü daha az elde edilmektedir (Utlu ve Koçak 2008, Karabektaş 2009, Çelik vd. 2015, Aldhaidhawi vd. 2017).

Maksimum motor momenti dizel ve B15 yakıtları için 1800 d/d’da elde edilmiştir. Bu motor devrinde maksimum şarj kütlesi silindire alınmaktadır. Maksimum motor momentinin elde edildiği motor devrinden sonra hacimsel verimin azalması ve sürtünme kayıplarının artması nedeniyle motor momenti azalmaktadır (Alahmer 2013, Seifi vd. 2016, Yılmaz 2019). 1800 d/d motor devrinde, B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre motor momentinde ortalama olarak %2,66 azalma gözlenmiştir. Buna B15 yakıtının ısı değeri dizel yakıtına göre daha az olması sebep olmaktadır (Yılmaz 2019).



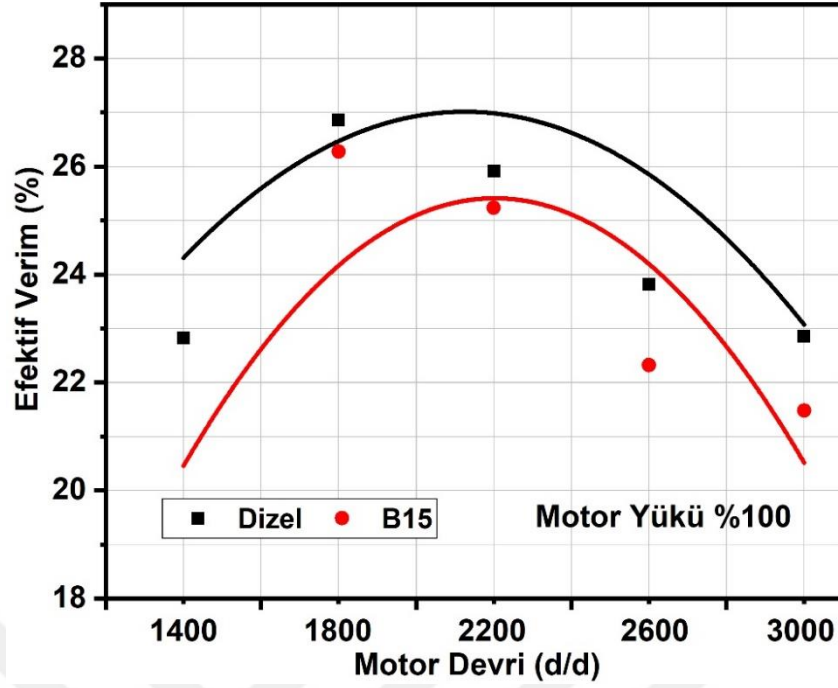
Şekil 5.1 Test yakıtlarının motor momenti ve motor gücü üzerindeki etkileri.

Motorun birim güç üretimi başına tükettiği yakıt miktarı özgül yakıt tüketimi ile ifade edilmektedir (Heywood, 1988). Motor devrine bağlı özgül yakıt tüketimi değişimleri Şekil 5.2’de görülmektedir. Özgül yakıt tüketimi düşük motor devirlerinde yüksek iken motor devrinin artması ile 1800 d/d motor devrine kadar azalmakta ve daha sonra artmaktadır. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketiminde ortalama olarak %9,28 artış elde edilmiştir. Bu artışın temel nedeni B15 yakıtının ısı değeri dizel yakıtına göre daha düşük olmasıdır. Maksimum motor momenti ve minimum özgül yakıt tüketimleri aynı motor devrinde elde edilmiştir. B15 yakıtının yüksek viskozitesi ve yakıt pompasının mekanik kontrollü olması özellikle düşük motor devirlerinde yakıtın atomizasyonunu olumsuz etkilemekte ve özgül yakıt tüketimi yüksek çıkmaktadır (Özsezen 2007). Orta motor hızlarında yanma için sürenin yeterli olması ve hava hareketlerinin artması karışımın homojenliğini artırmakta ve özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Yüksek motor devirlerinde ise yanma için zamanın yetersiz olması ve sürtünme kayıplarının artması özgül yakıt tüketiminin artmasına sebep olmaktadır (Örs 2014).



Şekil 5.2 Özgül yakıt tüketiminin değişimi.

Motor performansının belirlenmesinde önemli bir parametre olan efektif verimin değişimi Şekil 5.3’de görülmektedir. Efektif verim motorda yakıt ile silindire sürülen ısı enerjisinin ne kadarının faydalı güce dönüştüğünün bir ifadesidir (Heywood, 1988). Motor devrinin artması ile dizel ve B15 yakıtlarının efektif verimleri maksimum motor momentinin elde edildiği 1800 d/d motor devrine kadar artmakta ve daha sonra azalmaktadır. Düşük motor devirlerinde silindir içi hava hareketlerinin yetersiz olması nedeniyle efektif verim değerleri düşük elde edilmiştir (Örs 2014). Motor devrinin artışı ile silindir içi ortalama gaz sıcaklığı artmakta ve yanma süreci iyileşmektedir. Devrin artışı karışımın homojenliğini arttırmakta, ısı kayıpları ve gaz kaçakları azalmaktadır. Dizel ve B15 yakıtları ile maksimum efektif verim 1800 d/d’da sırasıyla %26,86 ve %26,27 elde edilmiştir. Bu motor devrinden sonra, motor devrinin artışı ile yanma için süre yetersiz kalmakta ve efektif verim azalmaktadır (Örs 2014). B15 yakıtının viskozite ve yoğunluğu dizel yakıtına göre yüksek iken, ısı değeri ise düşüktür. Yüksek viskozite atomizasyonun, yakıtın buharlaşmasının ve yanmanın azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle efektif verim azalmaktadır (Öner ve Altun 2009). Efektif verim ile özgül yakıt tüketimi ters orantılıdır (Polat vd. 2013). B15 yakıtının yüksek yoğunluğu ve düşük ısı değeri nedeni ile özgül yakıt tüketimi artarken, efektif verim azalmaktadır (Öner ve Altun 2009).



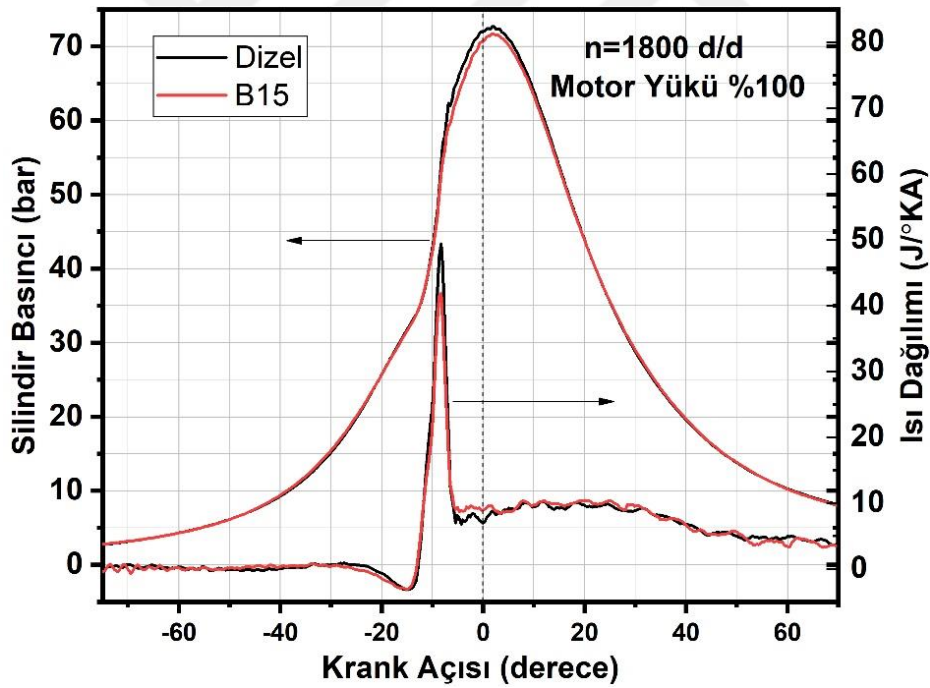
Şekil 5.3 Efektif verimin değişimi.

5.2 Yanma Analizi

Yanma analizi, dizel ve B15 yakıtları için maksimum motor momentinin elde edildiği 1800 d/d motor devrinde ve tam gaz kelebek açıklığında gerçekleştirilmiştir. Bu motor devrinde; silindir basıncı, ısı dağılımı, tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, çevrimsel farklılıklar, maksimum basınç artış oranı ve maksimum silindir basıncı parametreleri dizel ve B15 yakıtları için karşılaştırılmıştır.

Yanma sürecinin değerlendirilmesinde en önemli değişkenlerden biri olan silindir içi basıncının test yakıtları için değişimi Şekil 5.4’de görülmektedir. Dizel ve B15 yakıtının silindir basıncı ve ısı dağılımı, ardışık 50 çevrimin ortalaması alınarak krank açısına göre incelenmiştir. B15 ve dizel yakıtlarının kullanımı ile silindir içi basınç verilerinde belirgin farklar görülmemiştir. Biyodizelin düşük uçuculuğa ve yüksek viskoziteye sahip olması, tutuşma gecikmesi süresince yakıtın atomizasyonunun bozulmasına ve zayıf yakıt hava karışımı oluşumuna sebep olur. Bu durum yanma sürecini olumsuz etkilediği için maksimum silindir içi basınç, biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile azalmaktadır (Kumar vd. 2003, Gümüş 2010, Çelik ve Özgören 2017). Bu nedenle en yüksek silindir içi basıncı dizel yakıtı ile elde edilmiştir.

Şekil 5.4’de görüldüğü gibi püskürtme başlangıcı fabrika verileri ile uyumlu şekilde yaklaşık olarak 24 °KA değerindedir. Püskürtülen yakıtın ortamdan ısı çekmesi sonucu ısı dağılım eğrisi negatif değer almaktadır. İlk alev çekirdeğinin oluşması ile tutuşma gecikmesi süresi sona ermekte ve yakıtın yanmaya başlaması ile ısı dağılımı hızlı bir şekilde yükselmektedir (Uyumaz 2009, Örs 2014, Sürer vd. 2022). Dizel yakıtının ısı dağılımı B15 yakıtına göre daha yüksek elde edilmiştir. Dizel yakıtının düşük viskozitesi ve yoğunluğu nedeniyle uçuculuğu yüksektir. Düşük uçuculuk dizel yakıtının hava ile daha iyi karışmasını sağlamakta ve ısı salınımı daha yüksek elde edilmektedir (Qi vd. 2010, Çelik ve Özgören 2017). Ayrıca dizel yakıtının tutuşma gecikmesi süresinin uzun olması, yanma odasında daha fazla yakıt birikmesine ve dolayısıyla ısı salınımının artmasına yol açar (Qi vd. 2010). Difüzyon yanma aşamasında piston üst ölü noktayı hemen geçtikten sonra B15 yakıtı ile dizele göre daha fazla ısının açığa çıktığı görülmektedir.



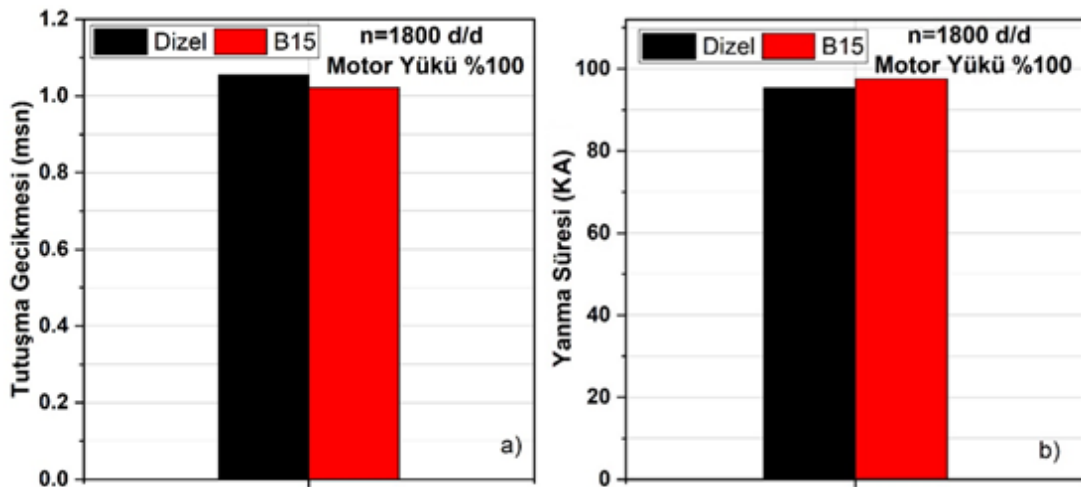
Şekil 5.4 Test yakıtlarının silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkileri.

Dizel motorlarından yanmanın seyrini direkt olarak etkileyen önemli parametrelerden biri tutuşma gecikmesidir (Liu ve Karim 1995, Gümüş 2010). Tutuşma gecikmesi yakıtın silindire enjeksiyonunun başlaması ile karışım içindeki ekzotermik enerji salınımı nedeniyle silindir basıncında ilk tespit edilebilir artışın gerçekleştiği an arasındaki zaman

aralığı olarak tanımlanır (Liu ve Karim 1995). Tutuşma gecikmesi süresi arttıkça silindir içerisindeki yakıt miktarı artmaktadır. Silindir içerisinde biriken yakıtın ani bir şekilde yanmasıyla, silindir içi basınç ani bir şekilde yükselmekte ve dizel vuruntusuna neden olabilmektedir (Aldhaidhaw vd. 2017).

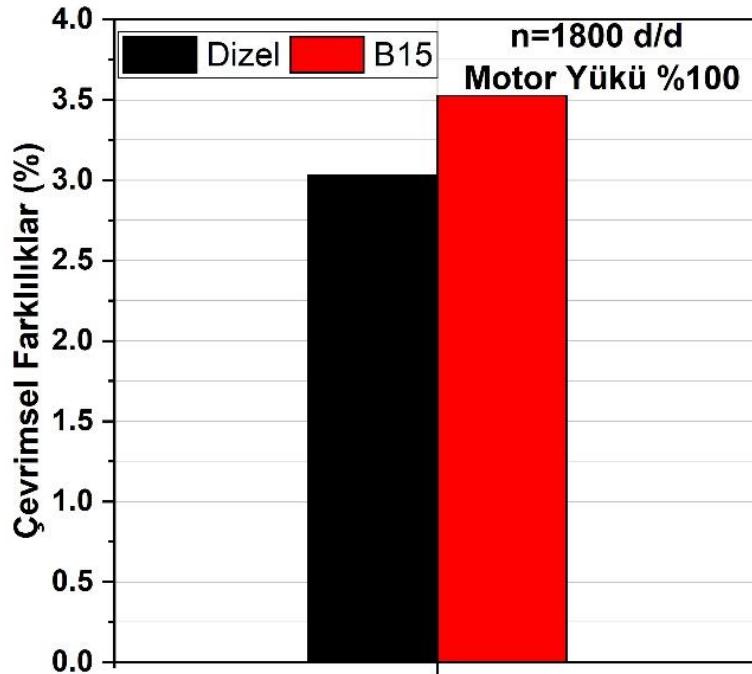
Şekil 5.5-a’da her iki test yakıtı ile belirlenen tutuşma gecikme süreleri görülmektedir. Dizel yakıtının tutuşma gecikmesi süresi B15 yakıtına göre daha uzundur. Yakıt türü, yakıt kalitesi, hava-yakıt oranı, motor hızı, yakıt atomizasyonunun kalitesi, emme havası sıcaklığı ve basıncı gibi birçok parametre tutuşma gecikmesini etkilemektedir (Gümüş 2010). Yakıtın tutuşma kalitesi genellikle setan sayısı ile karakterize edilir. Daha yüksek setan sayısı genellikle daha kısa tutuşma gecikmesi anlamına gelmektedir (Çanakçı 2007). Biyodizel ve karışımlarının dizel yakıtlarına göre daha yüksek setan sayısına sahip olması nedeniyle tutuşma gecikme süreleri daha kısa elde edilmiştir (Çanakçı 2007, Gümüş 2010, Çelik ve Özgören 2017).

Yanma süresi KA10 ve KA90 arasındaki aç ı aralığından hesaplamaktadır (Gürbüz vd. 2013, Shameer ve Ramesh 2018, Demirtürk 2020). Tam yükte 1800 d/d’da yapılan deneyde yanma süresinin değişimi Şekil 5.5-b’de görülmektedir. B15 yakıtı ile dizele göre yanma süresinin uzadığı görülmektedir. Biyodizel yakıtların daha yüksek viskozitesi ve kaynama noktası, yakıt enjeksiyon prosesini (sprey, buharlaşma ve atomizasyon) etkileyerek daha yavaş yanma ve daha uzun yanma süresine neden olabilir (Can 2014).



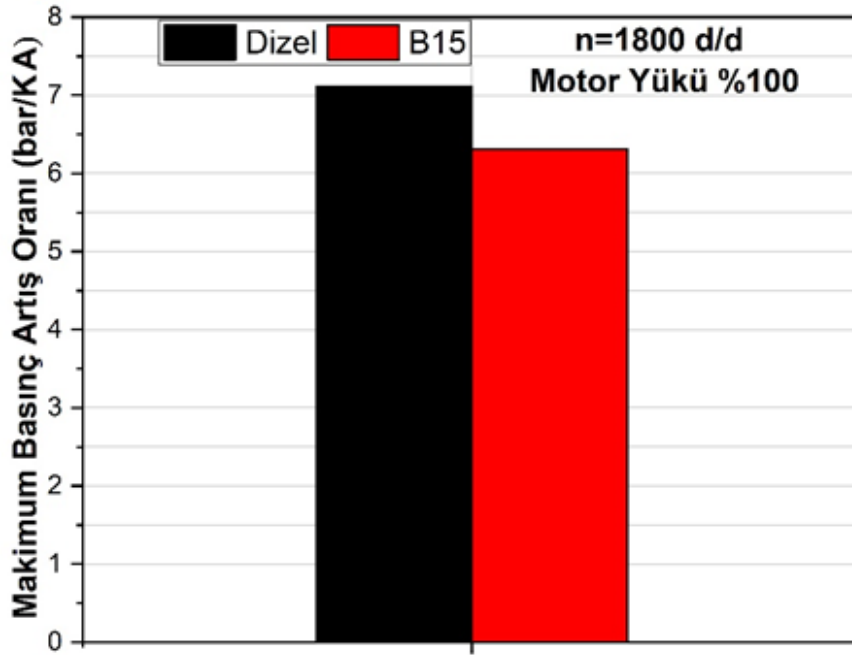
Şekil 5.5 Tutuşma gecikmesi süresi ve yanma süresinin değişimi.

Dizel motorların yanma parametrelerindeki çevrimden çevrime değişimler yüksek emisyonlara, güç çıkışında dalgalanmalara ve düşük verimliliğe sebep olan istenmeyen bir durumdur. Yakıt tüketimi, egzoz gazı emisyonları ve motor performansı yanma karakteristiklerindeki çevrimsel değişimlerden etkilenir. Dizel motorlarında uzun tutuşma gecikmesi süresi, silindire enjekte edilen yakıt ve hava kütleindeki değişimler, silindir içindeki türbülans ve girdap nedeniyle hava hareketindeki değişimler, her çevrimde motor silindirindeki taze karışımla karışan artık gazlardaki farklılıklar, yanmadan önce karışımın hazırlanmasındaki değişimler ve yakıt hattındaki farklılıklar çevrimsel farklılıklara sebep olmaktadır. Ayrıca çevrimsel farklılıklar dizel motorlarında kullanılan yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir (Sharma vd 2023). Çevrimsel farklılıkların artması motorun kararlı çalışmasına engel olmaktadır. Literatürde motorun stabil çalışabilmesi için çevrimsel farklılıklar %10'u aşmamalıdır (Heywood, 1988). Çevrimsel farklılıkların değişimi Şekil 5.6'da verilmektedir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre çevrimsel farklılıklar artmıştır. Biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluğuna bağlı kötüleşen homojenlik, dizele göre düşük ısı enerjisi çevrimden çevrime farklılıkların artmasına neden olmaktadır.



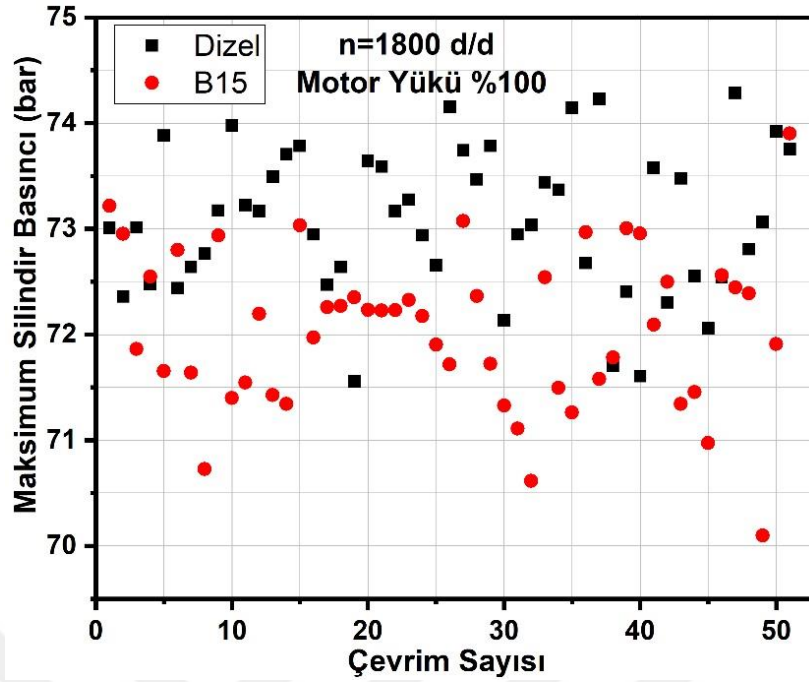
Şekil 5.6 Çevrimsel farklılıkların değişimi.

Basınç artış oranı, motorun hızlı yanma periyodunu ve motor yanma gürültüsünü değerlendirmek için önemli göstergelerden biridir (Ma vd. 2021). Maksimum basınç artış oranı değişimi Şekil 5.7’de görülmektedir. Maksimum silindir içi basınç artış oranı dizel ve B15 yakıtları ile sırasıyla 7,118 ve 6,313 bar/KA olduğu tespit edilmiştir. Dizel yakıtının basınç artış oranı B15 yakıtına göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum dizel yakıtının ısıl değerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Uyaroğlu vd. 2021).



Şekil 5.7 Test yakıtlarının maksimum basınç artış oranı üzerindeki etkileri.

Şekil 5.8’de ardışık 50 çevrime bağlı maksimum silindir basınç değerlerinin dizel ve B15 yakıtları ile değişimleri görülmektedir. Dizel yakıtı kullanımı ile maksimum silindir içi basınç değerleri yüksek elde edilmiştir. Dizelin yüksek ısıl enerjisi yanma sonu elde edilen silindir basıncının artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda biyodizelin kimyasal yapısında bulunan oksijenin daha kontrollü ve kararlı yanmaya neden olduğu, B15 yakıtı ile maksimum silindir basıncı değerlerinin dizele göre azaldığı görülmektedir.



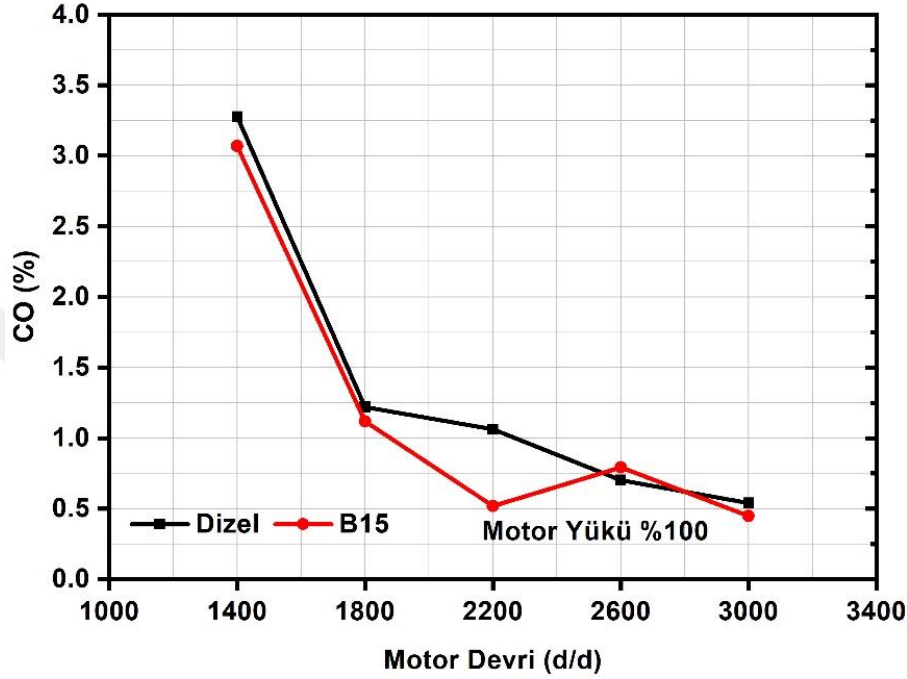
Şekil 5.8 Ardışık 50 çevrime bağı maksimum silindir basıncı değışimleri.

5.3 Egzoz Emisyonları

CO ve HC emisyonları dizel ve B15 yakıtları için tam yükte ve motor devrine bağı olarak incelenmiştir.

CO emisyonu yanma sürecinde yetersiz oksijen veya silindir içi sıcaklık nedenlerinden dolayı açığa çıkan eksik yanma ürünüdür. Yanma sürecinde yeterli miktarda bulunmayan oksijen CO emisyonlarının oluşmasına neden olmaktadır (Heywood, 1988). Şekil 5.9’da dizel ve B15 test yakıtları için motor devrine bağı ölçülen CO emisyonlarının değışimi görülmektedir. Düşük motor devirlerinde CO emisyonu yüksek iken, motor devrinin artışına bağı olarak azalmaktadır. Düşük motor devirlerinde silindir içi ortalama gaz sıcaklığı kısmen yetersiz kalmakta, oksidasyon reaksiyonları yavaşlamakta ve yanma reaksiyonlarını kötüleşmektedir. Motor devrinin artmasına bağı olarak silindir içi sıcaklıkları da artmakta ve daha homojen yakıt-hava karışımı oluşmaktadır. Bunun sonucunda yanma odasının genelinde oksidasyon reaksiyonlarının iyileşmekte ve CO emisyonu oluşumu yavaşlamaktadır. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre CO emisyonunun ortalama olarak %12,53 azaldığı görülmektedir. Biyodizel %10-12 oranında oksijen içermektedir (Yeşilyurt vd. 2018). Biyodizelin oksijen içermesi yanmayı

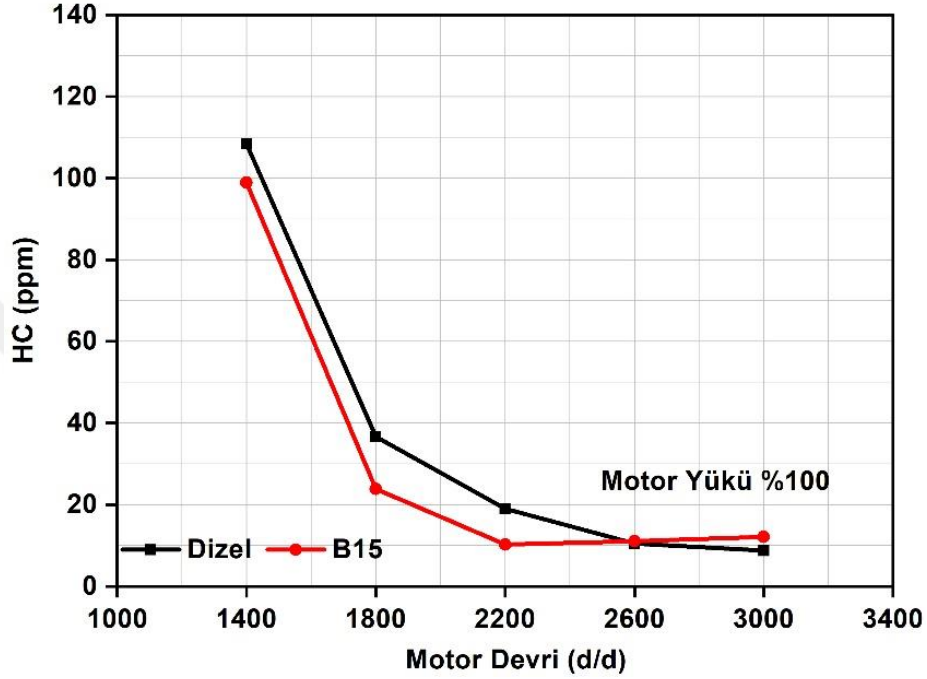
iyileştirmekte ve CO emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır (Uyaroğlu 2015, Okumuş 2024). Buna ilaveten, biyodizelin setan sayısının yüksek olması yakıtça zengin bölgelerin azalmasını ve CO emisyonlarının düşük elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Uyaroğlu 2015).



Şekil 5.9 Test yakıtlarının CO emisyonları üzerindeki etkileri.

HC emisyonları yanma odasında ilerleyen alevin silindir cidarlarında sönmesi nedeni ile oluşabilmektedir. Bununla birlikte düşük yanma sıcaklıkları, yetersiz hava-yakıt karışımı HC emisyonu oluşumuna neden olmaktadır (Heywood, 1988). Şekil 5.10’da dizel ve B15 yakıtları için motor devrine bağlı olarak HC emisyonlarının değişimini görülmektedir. Düşük motor devirlerinde HC emisyonu yüksek iken, motor devrinin artması ile azalmaktadır. Düşük motor devirlerinde özgül yakıt tüketiminin yüksek olması ve atomizasyon oranının ise düşük olması her iki yakıt içinde HC emisyonlarının yüksek elde edilmesine sebep olmaktadır. Motor devrinin artması ile silindir içi basınç ve sıcaklıkları artmaktadır. Buna bağlı olarak oksidasyon reaksiyonları ve türbülanstaki artışlar HC emisyonunun azalmasına sebep olmaktadır (Özsezen ve Çanakçı 2008). B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre HC emisyonunun ortalama olarak %14,8 azaldığı görülmektedir. Düşük aromatik hidrokarbon içeriği, kısa tutuşma gecikmesi süresine ve buna bağlı olarak daha az HC emisyonuna sebep olmaktadır. Biyodizel düz zincirli

moleküler yapıya sahip yağ asidi metil esteridir. Bu, tam yanmayı ve HC emisyonunun azalmasını sağlamaktadır. Biyodizelin oksijen içermesi, silindir içerisindeki aşırı zengin karışım bölgelerini azaltmakta ve yanma verimini artırmaktadır. Buna bağlı olarak yerel bölgede oksijen eksikliğinden kaynaklanan HC emisyonları azalır (Zhihao vd. 2011).



Şekil 5.10 Test yakıtlarının HC emisyonları üzerindeki etkileri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Petrol kökenli yakıtlar dizel motorlarda kullanılmaktadır. Petrol kökenli yakıtların rezervlerinin azalması ve çevreye olan olumsuz etkileri alternatif yakıtlara olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Dizel motorlarda alternatif yakıt bitkisel yada hayvansal yağlardan transesterifikasyon metodu ile üretilen biyodizeldir. Biyodizelin transesterifikasyon yolu ile üretiminde geleneksel ısıtma yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak geleneksel ısıtma kullanılan transesterifikasyon reaksiyonunda ısı enerjisi reaktör yüzeyinden konveksiyon, iletim ve radyasyon yoluyla karışımına aktarıldığı için büyük miktarda enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden geleneksel ısıtma ile transesterifikasyon reaksiyonu daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Geleneksel ısıtmaya alternatif olarak süperkritik akışkan, mikrodalga ısınımı ve ultrasonik dalga gibi yeni teknolojiler biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılan yeni teknolojilerden biriside mikrodalga destekli biyodizel üretimidir. Mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonunda, enerji doğrudan reaktanlara iletiğinden, ısı transferi geleneksel ısıtmaya göre daha etkili olmakta ve reaksiyon süresi azalmaktadır. Buna ilaveten mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonu ile düşük enerji tüketimi ve yüksek dönüşüm verimliliğine sahip biyodizel üretimi gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, ev tipi bir mikrodalga modifiye edilerek aspir yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga destekli transesterifikasyon reaksiyonu, %0,75 ağırlıkça yağ/katalizör oranı, ağırlıkça %25 alkol/yağ oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı, 100 W mikrodalga çıkış gücü, 500 d/d karıştırma hızı ve 15 dk reaksiyon süresinde gerçekleştirilmiştir.

Deneylerde kullanılan yakıtların oranları D100 (%100 dizel yakıtı) ve B15 (%85 dizel yakıtı + %15 biyodizel)) olarak belirlenmiştir. Test yakıtlarının bazı özellikleri belirlenmiştir. Yakıtlar tek silindirli su soğutmalı bir dizel motorunda test edilmiştir. Deneylerde test yakıtlarının motor performans (motor gücü, motor moment, özgül yakıt tüketimi ve efektif verim) ve egzoz emisyonlarına (CO ve HC) etkileri tam yükte ve motor devrine bağlı olarak incelenmiştir. Yanma analizi ise maksimum motor momentinin elde

edildiği 1800 d/d motor devrinde ve tam gaz kelebek açıklığında gerçekleştirilmiştir. Bu motor devrinde; silindir basıncı, ısı dağılımı, tutuşma gecikmesi süresi, yanma süresi, çevrimsel farklılıklar maksimum basınç artış oranı ve maksimum silindir basıncı parametreleri test yakıtları için karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Dizel yakıtı ile B15 yakıtına göre tüm devirlerde daha fazla motor gücü elde edilmiştir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre motor gücünde ortalama olarak %4,05 azalma elde edilmiştir. Bu azalmanın biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun dizel yakıtından daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Maksimum motor momenti her iki yakıt için 1800 d/d'da elde edilmiştir. 1800 d/d motor devrinde, B15 yakıtı kullanımı ile motor momenti dizel yakıtına göre %2,66 daha düşük elde edilmiştir. Motor momentindeki bu azalmaya B15 yakıtının ısı değeri dizel yakıtına göre daha düşük olması sebep olmaktadır.
- Minimum özgül yakıt tüketimi her iki yakıt içinde 1800 d/d motor devrinde elde edilmiştir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre özgül yakıt tüketiminde ortalama olarak %9,28 artış elde edilmiştir. Özgül yakıt tüketimindeki bu artışın B15 yakıtının ısı değeri dizel yakıtına göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Maksimum efektif verim dizel ve B15 yakıtları için maksimum moment ile aynı motor devrinde (1800 d/d) elde edilmiştir. B15 yakıtının viskozite ve yoğunluğu dizel yakıtına göre yüksek iken, ısı değeri ise düşüktür. Yüksek viskozite atomizasyonun, yakıtın buharlaşmasının ve yanmanın azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle efektif verim azalmaktadır.
- Maksimum moment devri olan 1800 d/d motor devrinde B15 yakıtı için silindir basıncı ve ısı dağılımı değerleri dizel yakıtına göre daha az elde edilmiştir. Biyodizelin düşük uçuculuğu ve yüksek viskozitesi, tutuşma gecikmesi süresince

yakıt atomizasyonunun bozulmasına ve zayıf yakıt hava karışımı oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle maksimum silindir içi basıncı biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile azalmaktadır.

- B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre tutuşma gecikmesi süresi biyodizel ve karışımlarının yüksek setan sayısı nedeniyle kısalmıştır. Biyodizel yakıtların daha yüksek viskozitesi ve kaynama noktası daha uzun yanma süresine neden olmaktadır.
- B15 ve dizel yakıtları için çevrimsel farklılıklar oldukça düşük olarak belirlenmiştir. Biyodizelin yüksek viskozite ve yoğunluğuna bağlı kötüleşen homojenlik, dizele göre düşük ısı enerjisi çevrimden çevrime farklılıkların artmasına neden olmaktadır.
- Maksimum silindir içi basınç artış oranı dizel ve B15 yakıtları ile sırasıyla 7,118 ve 6,313 bar/KA olarak belirlenmiştir. Maksimum silindir içi basınç artış oranı, dizel yakıtının ısı değeri yüksek olması nedeniyle daha yüksek elde edilmiştir.
- B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre CO emisyonlarının azaldığı görülmektedir. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre CO emisyonunun ortalama olarak %12,53 azaldığı görülmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği yanmayı iyileştirmekte ve CO emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır.
- Düşük motor devirlerinde HC emisyonu maksimum iken motor devrinin artmasına bağlı olarak azalmaktadır. Motor devri arttıkça homojenlik ve yanma odası gaz sıcaklığı artmakta HC oluşumu yavaşlamaktadır. Motor devrinin artması ile silindir içi basınç ve sıcaklıkları artmaktadır. Buna bağlı olarak oksidasyon reaksiyonları ve türbülanstaki artışlar HC emisyonunun azalmasına sebep olmaktadır. B15 yakıtı kullanımı ile dizel yakıtına göre HC emisyonunun ortalama olarak %14,8 azaldığı görülmektedir. Düşük aromatik hidrokarbon içeriği, kısa tutuşma gecikmesi süresine ve buna bağlı olarak daha az HC emisyonuna sebep olmaktadır.

Mikrodalga destekli transesterifikasyon metodu ile biyodizel üretimi ile yapılan deneysel çalışma sonucunda,

- Mikrodalga destekli transesterifikasyonla biyodizel üretiminde reaksiyon süresi ve buna bağı olarak enerji tüketimi azaldığı için biyodizel üretiminde kullanımı için büyük reaktörler imal edilebilir.
- Mikrodalga ile elde edilen biyodizelin NO_x ve is emisyonları ile ilgili deneysel çalışmalar yapılabilir.



7. KAYNAKLAR

- Abbaszaadeh A, Ghobadian B, Omidkhah MR and Najafi G, 2012, Current biodiesel production technologies: A comparative review, *Energy Conversion and Management*, 63, 138-148.
- Ahmed W O, 2015, Investigation of Biodiesel Production from Safflower Oil, Anadolu University, Graduate School of Sciences, Doctoral dissertation, 72p, Eskişehir.
- Aksoy L, 2010, Alternatif enerji kaynağı olarak biyodizel ve üretim prosesleri, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(3), 45-52.
- Akhtar R, Hamza A, Razzaq L, Hussain F, Nawaz S, Nawaz U, Mukaddas Z, Jauhar TA, Silitonga AS, Saleel CA, 2023, Maximizing biodiesel yield of a non-edible chinaberry seed oil via microwave assisted transesterification process using response surface methodology and artificial neural network techniques, *Heliyon*, 1;9(11), e22031.
- Aktaş E, Demir Ö, Uçar D, 2021, Biodiesel production methods. *International Journal of Energy and Smart Grid*. 5(1-2),1-100.
- Alahmer A, 2013, Influence of Using Emulsified Diesel Fuel on the Performance and Pollutants Emitted from Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 73, 361-369.
- Aldhaidhawi M, Chiriac R, Badescu V, 2017, Ignition Delay, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Rapeseed Biodiesel–A Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 178-186.
- Ali MAM, Gimbun J, Lau KL, Cheng CK, Vo DV, Lam SS, Yunus RM, 2020, Biodiesel synthesized from waste cooking oil in a continuous microwave assisted reactor reduced PM and NOx emissions, *Environmental research*, 185,109452.
- Allami HA, Tabasizadeh M, Rohani A, Farzad A, Nayebzadeh H, 2019, Precise evaluation the effect of microwave irradiation on the properties of palm kernel oil biodiesel used in a diesel engine, *Journal of cleaner production*, 241, 117777.
- Alptekin E, Çanakçı M, 2006, Biyodizel ve Türkiye’deki durumu, *Mühendis ve Makine*, 47, 57-64.

- Andaç İ, 2022. Atık lastik pirolizinden elde edilen pirolitik yağın endüstriyel kullanımı açısından kalitesinin belirlenmesi ve artırılmasına dair metotların araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 126s, Sakarya.
- Azcan N, Danisman A, 2007, Alkali catalyzed transesterification of cottonseed oil by microwave irradiation, *Fuel*, 86(17-18), 2639-44.
- Azcan N, Danisman A, 2008, Microwave assisted transesterification of rapeseed oil, *Fuel*, 87 (10-11), 1781-8.
- Aydın S, 2010, Aspir Yağından Biyo-Yakıt Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82s, Elazığ.
- Boru B, 2012, Dolaylı basınç ölçüm yöntemi kullanılarak performansa dayalı emisyon sistemi tasarımı ve gerçekleşmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 140s, Sakarya.
- Calam A, 2015, Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorda sıkıştırma oranının yanma ve performansa etkilerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 148s, Ankara.
- Can Ö, 2012, Bir DI Dizel Motorda Etanol Ön Karışımli Kısmi-HCCI Uygulamasının Yanma ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 207s, Ankara.
- Can Ö, 2014, Combustion Characteristics, Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fueled with a Waste Cooking Oil Biodiesel Mixture, *Energy Conversion and Management*, 87, 676-686.
- Chen KS, Lin YC, Hsu KH, Wang HK, 2012, Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system, *Energy*;38(1),151-6.
- anakcı M, 2007, Combustion Characteristics of a Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled with Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel, *Bioresource Technology*, 98, 1167-1175.

- Çelik M, Solmaz H, Yücesu H S, 2015, Pamuk Metil Esterine n-Heptan Katkısının Motor Performansı ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30, 361-369.
- Çelik M, Özgören Y Ö, 2017, The Determination of Effects of Soybean and Hazelnut Methyl Ester Addition to the Diesel Fuel on the Engine Performance and Exhaust Emissions, Applied Thermal Engineering, 124, 124-135.
- Demir V, 2023, Süperkritik metanol ortamında hint fıstığı (*jatropha curcas*) yağından biyodizel üretimi için katalizör geliştirilmesi ve biyodizel verimliliğinin araştırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 90s, İstanbul.
- Demir VG, 2018, Mikrodalga ısıtılmalı bir biyodizel reaktör tasarımı ve pilot ölçekli prototip geliştirilmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 182s, Balıkesir.
- Demirbas A, 2009, Progress and Recent Trends in Biodiesel Fuels, Energy conversion and management, 50, 14-34.
- Demirtürk S, 2020, Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motorda Farklı Yanma Stratejilerinin Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 156s, Isparta.
- Deniz Ç, 2013, Biyodizel Dizel Karışımlarının Bazı Fiziksel Özelliklerinin Biyodizel Oranı ile Değişimi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, Erzurum.
- Doğan O, 2012, Atık taşıt lastiğinden üretilen pirolitik yakıtın bir dizel motorda kullanımının deneysel olarak araştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 177s, Karabük.
- Duz M Z, Saydut A, Ozturk G, 2011, Alkali catalyzed transesterification of safflower seed oil assisted by microwave irradiation, Fuel Processing Technology, 92(3), 308-13.
- Ergan BT, 2013, Mikrodalga Destekli Proseslerin Kinetik-Mekanistik-Termodinamik Modellenmesi ve Analizi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 197s, Gebze.

- Gümüş M, 2010, A Comprehensive Experimental Investigation of Combustion and Heat Release Characteristics of a Biodiesel (Hazelnut Kernel Oil Methyl Ester) Fueled Direct Injection Compression Ignition Engine, *Fuel*, 89, 2802-2814.
- Gürbüz H, Buran D, Akçay İ H, 2013, An Experimental Study on Performance and Cyclic Variations in a Spark Ignition Engine Fuelled with Hydrogen and Gasoline, *Journal of Thermal Science and Technology*, 33, 33-41.
- Heywood J B, 1988, *Internal Combustion Engines Fundamentals*, McGraw-Hill Education, New York.
- Hsiao MC, Lin CC, Chang YH, Chen LC, 2010, Ultrasonic mixing and closed microwave irradiation-assisted transesterification of soybean oil, *Fuel*, 89(12), 3618-22.
- Işık M, Aydın H, Yücel H, Budak N, Oktay H, and Bayındır H, 2016. Aspir ve Kanola Biyodizeli Kullanımının Egzoz Emisyonu ve Motor Performansına Etkilerinin İncelenmesi, *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3(1), 1-11.
- Kaplan N and Baykov, B D, 2014. A Review On New Methods Used For The Production Of Biodiesel. *Petroleum & Coal*, 56(1), 62-73.
- Kappe CO, 2004 *Controlled microwave heating in modern organic synthesis*, *Angewandte Chemie International Edition*, 43(46), 6250-84.
- Karabektas M, 2009, The Effects of Turbocharger on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel, *Renewable Energy*, 34, 989-993.
- Karakurt B, 2022, Ultrasonik yöntem ile atık kızartma yağından biyodizel üretimi, Sinop Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Sinop.
- Kaşıkcı M, 2009, Biyodizel Üretiminde Alümina Destekli Heterojen Katalizör Tasarımı ve Reaksiyon Çalışmaları, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, Kocaeli.
- Kiani S, 2014, Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretiminde Yüzey Aktif Maddelerin Etkisi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Erzurum.

- Korkmaz P M, 2020, Health effects of carthamus tinctorius (safflower) plant and development of sterilization protocol of its seeds, Yeditepe University, Institute of Health Sciences, Master Thesis, 72p, İstanbul.
- Kumar M S, Ramesh A, Nagalingam B, 2003, An Experimental Comparison of Methods to Use Methanol and Jatropha Oil in a Compression Ignition Engine, Biomass and Bioenergy, 25, 309-318.
- Lertsathapornsuk V, Pairintra R, Aryusuk K, Krisnangkura K, 2008, Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator, Fuel Processing Technology, 89(12),1330-6.
- Lin Y C, Hsu K H, Lin J F, 2014, Rapid palm-biodiesel production assisted by a microwave system and sodium methoxide catalyst, Fuel, 115,306-11.
- Liu Z, Karim G A, 1995, The Ignition Delay Period in Dual Fuel Engines. SAE transactions, 354-362.
- Ma Q, Zhang Q, Liang J, Yang C, 2021, The Performance and Emissions Characteristics of Diesel/Biodiesel/Alcohol Blends in a Diesel Engine, Energy Reports, 7, 1016-1024.
- Milano J, Ong HC, Masjuki HH, Silitonga AS, Chen WH, Kusumo F, Dharma S, Sebayang AH, 2018, Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-Calophyllum inophyllum oil via response surface methodology, Energy conversion and management, 158, 400-15. 6.
- Motasemi F, Ani F N, 2012, A Review on Microwave-Assisted Production of Biodiesel, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 4719-4733.
- Okumuş F, 2024, Dizel Motorlarda Amonyak ve Biyodizelin Üçlü Yakıt Olarak Kullanılmasının Performans ve Emisyonlar Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 151s, İstanbul.
- Opuz M, 2022, Biyodizel İçerisine Metalik Esaslı Yakıt Katkı Maddesi İlavesinin Motor Performansı ve Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Afyon

Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Afyonkarahisar.

Öner C, Altun Ş, 2009, Biodiesel Production from Inedible Animal Tallow and an Experimental Investigation of Its Use as Alternative Fuel in a Direct Injection Diesel Engine, *Applied energy*, 86, 2114-2120.

Örs İ, 2014, Biyoyakıt kullanan bir dizel motorunun performans, yanma ve emisyon analizi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165s, Konya.

Özdemir Z Ö, 2008, Sentetik viral peptidler kullanılarak polielektrolit esaslı biyokonjugatların geliştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 201s, İstanbul.

Özdemir Z Ö, Mutlubaş H, 2016, Biyodizel üretim yöntemleri ve çevresel etkileri, *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2), 129-143.

Özsezen A N, 2007, Atık Palmiye Yağından Üretilen Biyodizelin Motor Performans ve Emisyon Karakterleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 179s, Kocaeli.

Özsezen A N, Çanakcı M, 2008, Atık Kızartma Yağından Elde Edilen Metil Esterin Ön Yanma Odalı Bir Dizel Motorda Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23, 395-404.

Qi D H, Chen H, Geng L M, Bian Y Z, 2010, Experimental Studies on the Combustion Characteristics and Performance of a Direct Injection Engine Fueled with Biodiesel/Diesel Blends, *Energy Conversion and Management*, 51, 2985-2992.

Polat S, Solmaz H, Yücesu H S, Uyumaz A, 2013, Bir Dizel Motorunun Bilgisayar Yardımı ile Termodinamik ve Performans Analizi, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 1, 139-151.

Rhithuparna D, Ghosh N, Rokhum SL, Halder G, 2024, Current progress and future outlooks of microwave-irradiated biodiesel production: A holistic review, *Chemical Engineering Journal*, 149033.

- Seifi M R, Hassan-Beygi S R, Ghobadian B, Desideri U, Antonelli M, 2016, Experimental Investigation of a Diesel Engine Power, Torque and Noise Emission Using Water–Diesel Emulsions. *Fuel*, 166, 392-399.
- Sajjadi B, Aziz AA, Ibrahim S, 2014, Investigation, modelling and reviewing the effective parameters in microwave-assisted transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 762-77.
- Shameer P M, Ramesh K, 2018, Assessment on the Consequences of Injection Timing and Injection Pressure on Combustion Characteristics of Sustainable Biodiesel Fuelled Engine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 45-61.
- Sharma A, Kumar P, Sandhu S S, Singh M, 2023, Experimental Investigation into the Effects of Argemone Biodiesel/Diesel Blends on Cyclic Variations in a Multi-Cylinder CRDI Engine, *Clean Energy*, 7, 363-374.
- Soylu Erşahin M, 2018, Aspir Yağının Yağ Kalitesinin Belirlenmesi ve Yemeklik Yağ Olarak Kullanılma Potansiyelinin Araştırılması, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, İzmir.
- Söyler H, 2023, Atık zeytinden ultrasonik yöntem ile üretilen biyodizelin bir dizel motorda performans ve yanma karakteristikleri üzerine etkisinin incelenmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 135s, İstanbul.
- Sun J, Wang W, Yue Q, 2016, Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies, *Materials*, 9(4), 231.
- Sürer E, Solmaz H, Yılmaz E, Calam A, İpçi D, 2022, Dizel-Biyodizel Karışımına Karbon Nanotüp Katkısının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38, 1055-1064.
- Şahin D, 2017, Aspir Yağı ve Borik Asit İçerikli Organik Katkının Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özellikleri Üzerine Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Trabzon.
- Şimşek F, 2024, Fındık Yağından Elde Edilen Biyodizelin Karakteristik Özelliklerine Ultrasonik Banyo Uygulamasının Etkilerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(3), 1583-1596.

- Topal S, 2014, Atık kızartma yağından ultrasonik yöntemle biyodizel üretimi ve kullanımı, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 105s, Karabük.
- Utlı Z, Koçak M S, 2008, The Effect OF Biodiesel Fuel Obtained from Waste Frying Oil on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions, Renewable energy, 33, 1936-1941.
- Uyaroğlu A, 2015, Crambe Tohumlarından Biyodizel Üretimi ve Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 149s, Ankara.
- Uyaroğlu A, Gürü M, Kocakulak T, Uyumaz A, Solmaz H, 2021, Combustion, Performance and Emission Analyses of Organic Manganese-Added Crambe Abyssinica Biodiesel in a Direct Injection Diesel Engine, Fuel, 297, 120770.
- Uyumaz A, 2014, Homojen Dolgulu Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Benzin Motorunda Supap Kalkma Miktarının Yanma ve Performansa Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 219s, Doktora Tezi, Ankara.
- Yeşilyurt M, Arslan M, Eryılmaz T, 2018, Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarına Etanol Katılmasının Performans, Yanma ve Emisyon Karakteristiklerine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 38, 129-150.
- Yılmaz E, 2019, Investigation of the Effects of Diesel-Fusel Oil Fuel Blends on Combustion, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Single Cylinder Compression Ignition Engine. Fuel, 255, 115741.
- Yılmaz S, 2008, Süperkritik metanol kullanarak yağlardan biyodizel elde edilmesi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 98s, Denizli.
- Yusoff M N, Zulkifli N W, Sukiman N L, Kalam M A, Masjuki H H, Syahir A Z, Awang M S, Muhtaba M A, Milano J, Shamsuddin A H, 2022, Microwave irradiation-assisted transesterification of ternary oil mixture of waste cooking oil–Jatropha curcas–Palm oil: Optimization and characterization, Alexandria Engineering Journal, 61(12), 9569-82.
- Zhihao M, Xiaoyu Z, Junfa D, Xin W, Bin X, Jian W, 2011, Study on Emissions of a DI

Diesel Engine Fuelled with Pistacia Chinensis Bunge Seed Biodiesel-Diesel Blends, Procedia Environmental Sciences, 11, 1078-1083

