



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAYISI ÇEKİRDEĞİ KABUĞUNDAN ÜRETİLEN PİROLİTİK  
YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ  
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

**Gürkan KARA**

Danışman  
**Prof. Dr. Hakan ÖZCAN**

SAMSUN  
2022

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**KAYISI ÇEKİRDEĞİ KABUĞUNDAN ÜRETİLEN PİROLİTİK  
YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ  
DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Yüksek Lisans Tezi

**Gürkan KARA**

Danışman  
**Prof. Dr. Hakan ÖZCAN**

SAMSUN  
2022

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Gürkan KARA** tarafından, **Prof. Dr. Hakan ÖZCAN** danışmanlığında hazırlanan Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Üretilen Pirolitik Yakıtın Bir Dizel Motorda Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 9.2.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Unvanı Adı Soyadı</b> <b>Üniversitesi</b> <b>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı</b>	<b>İmza</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Başkan</b> (Danışman)	Prof. Dr. Hakan ÖZCAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Dr. Öğr. Üyesi Bilal SUNGUR Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY  
... / ... / ...  
Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

İmza  
10/01/2022  
Gürkan KARA

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı:** Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Üretilen Pirolitik Yakıtın Bir Dizel Motorda Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 10/01/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

İmza  
10/01/2022  
Prof. Dr. Hakan ÖZCAN

## ÖZET

### KAYISI ÇEKİRDEĞİ KABUĞUNDAN ÜRETİLEN PİROLİTİK YAKITIN BİR DİZEL MOTORDA KULLANIMININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Gürkan KARA

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans, Şubat/2022

Danışman: Prof. Dr. Hakan ÖZCAN

Küresel çapta sanayileşmenin artması ve teknolojinin gündelik hayat içerisindeki payının yükselmesi, buna mukabil fosil yakıtların tükenmekte olması ve fosil yakıtların aşırı kullanıma bağlı oluşan çevresel riskler, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışlarını hızlandırmıştır. Biyokütle enerjisine olan ilgi, fosil yakıtlara göre daha çevreci ve yenilenebilir bir enerji olması hasebiyle her geçen gün artmakta ve bu alandaki çalışmalar da hızla devam etmektedir. Bu tez çalışmasında, termokimyasal biyokütle dönüşüm yöntemlerinden birisi olan piroliz işlemi ile sıvı yakıt eldesi üzerine yoğunlaşmış ve elde edilen sıvı yakıtın dizel yakıt katkısı olarak kullanım olanakları araştırılmıştır. Ayrıca, literatürde farklı biyokütle çeşitleri, farklı piroliz proses parametreleri kullanılarak yapılan piroliz deneylerinin ve bu deneylerden elde edilen verilerin karşılaştırılmalı incelemesi yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların ışığında biyokütle olarak seçilen kayısı çekirdeği kabuğu; sabit yataklı bir piroliz reaktöründe, 550 °C proses sıcaklığında, 40 °C/dk ısıtma hızında ve 100 ml/dk azot gazı debisinde piroliz işlemine tabi tutulmuş ve optimum miktarda sıvı ürün elde edilmeye çalışılmıştır. Hammadde olarak kullanılan biyokütle ve reaksiyon sonucunda elde edilen sıvı ürüne, FTIR analizi ve literatürden alınan bilgiler ile yaklaşık içerik tayini yapılmıştır. Elde edilen pirolitik biyoyağın direkt olarak motorin ile karıştırılabilecek nitelikte olmadığı belirlenmiştir. Bundan dolayı elde edilen pirolitik biyoyağın dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilmesi için farklı çözücü ve yüzey aktif maddeler denenmiştir. Sonuçlar, %3 aseton, %5 bütanol ve Span 80 kullanımında biyoyağın motorine karıştırılarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kullanılan katkı maddeleri, motor performans ve emisyon değerlerine doğrudan etki edebilecek nitelikte olduğundan, pirolitik biyoyağın bağımsız olarak etkilerini görebilmek amacıyla deneylerde; saf motorin ve biyoyağ katkılı motorin karışımına ek olarak biyoyağ hariç katkılar ve motorin karışımını temsil eden yakıt da tek silindirli bir dizel motorunda motor performans ve egzoz emisyon testlerine tabi tutulmuştur. Motor performans ve egzoz emisyon testlerinin sonuçları, özgül yakıt sarfiyatında önemli bir değişim olmaksızın, biyoyağ hariç, katkılar ve motorin karışımını temsil eden yakıtın saf motorine göre ortalama olarak CO emisyonlarında %38,25 ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında %44,57 oranlarında azalma sağladığı, biyoyağ hariç katkılar ve motorin karışımını temsil eden yakıtta eklenen biyoyağın CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında sırasıyla ortalama %26,02 ve %48,82 oranlarında artışa sebep olduğu, eklenen pirolitik biyoyağın CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırıcı yönde etki göstermesine karşın yakıt karışımı içeriğinde bulunan çözücülerin emisyonları düşürücü etkisi daha baskın olduğundan saf dizel yakıtına göre yine de CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla; %22,19 ve %17,51 oranlarında azalma sağladığı gözlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Biyokütle, Biyoenerji, Piroliz, Sabit yataklı reaktör, Yakıt katkısı, Dizel motor, Motor performansı, Egzoz emisyonları

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF USAGE OF PYROLYTIC FUEL PRODUCED FROM APRICOT KERNEL SHELL IN A DIESEL ENGINE

Gürkan KARA

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, February/2022

Supervisor: Prof. Dr. Hakan ÖZCAN

Due to the increase in global industrialization and the increase in the share of technology in daily life, the depletion of fossil fuels and the environmental risks due to excessive use of fossil fuels have accelerated the search for sustainable and renewable energy sources. The interest in biomass energy is increasing day by day due to the fact that it is more environmentally friendly and renewable energy compared to fossil fuels, and studies in this field continue rapidly. This thesis focused on the production of liquid fuel by the pyrolysis process which is one of the thermochemical biomass conversion methods, and were made the investigation of possibilities of usage of the obtained liquid fuel as a diesel fuel additive. In addition, a comparative analysis of the pyrolysis experiments in the literature using different biomass types, different pyrolysis process parameters and the data obtained from these experiments were made. In the way of all these studies, the apricot kernel shell selected as biomass was subjected to pyrolysis process, in a fixed bed pyrolysis reactor, 550 °C process temperature, 40 °C/min heating rate and 100 ml/min nitrogen gas flow rate, and optimum amount of liquid product was tried to be obtained. The content of the biomass used as raw material and the liquid product obtained as a result of the reaction was determined by FTIR analysis and information obtained from the literature. It was observed that the obtained pyrolytic biooil did not have the ability to be blended with diesel. Therefore, different kinds of solvents and surfactants have been tried in order to use the obtained pyrolytic bio-oil as a diesel fuel additive. As a result, the biooil was suitably blended with the diesel in case %3 acetone, %5 butanol and Span 80 were used. Since the additives in the blend can directly affect the engine performance and emissions, in the experiments, in order to see the effects of the pyrolytic biooil independently, in addition to the pure diesel and mixture of diesel fuel with bio-oil and additives, the fuel representing the mixture of diesel fuel and additives excluding biooil was also subjected to engine performance and exhaust emission tests in a single-cylinder diesel engine. The results of engine performance and exhaust emission tests show that, without a significant change in specific fuel consumption, the fuel representing the mixture of additives and diesel fuel excluding biooil, provides an average of 38.25% reduction in CO emissions and 44.57% in NO<sub>x</sub>. When biooil is added into the fuel which represents the additives-diesel blend excluding biooil, it respectively caused the increase of 26.02% and 48.82% on CO and NO<sub>x</sub> emissions. Although the addition of pyrolytic bio-oil has an increasing effect on CO and NO<sub>x</sub> emissions, since the solvents in the fuel mixture have a more dominant effect on reducing emissions, the reductions on CO and NO<sub>x</sub> emissions were achieved which are respectively average 22.19% and 17.51% compared to pure diesel.

**Keywords:** Biomass, Bioenergy, Pyrolysis, Fixed bed reactor, Fuel additive, Diesel engine, Engine performance, Exhaust emissions

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalıştığım bu konuya yönelmemi sağlayan, zorlandığım yerlerde desteğini esirgemeyen, çalışmam için gerekli laboratuvar imkanlarına ulaşmamı sağlayan ve girdiğim bu yolda önüme ışık olan değerli danışmanım Prof. Dr. Hakan ÖZCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Gurbette yaşam zordur. Ailemden uzakta yaşadığım şu günlerde baba şefkatiyle yanımda duran, desteğini her daim yanımda hissettiğim, pek değerli hocam ve yöneticim Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkanı Prof. Dr. Naci KURGAN hocama sonsuz şükranlarımı sunarım.

Gerektiğinde bir abi, gerektiğinde yakın bir arkadaş, gerektiğinde ise tecrübeleriyle beni aydınlatan bir hoca olarak her zorlandığım durumda yardımlarını gördüğüm değerli çalışma arkadaşım Arş. Gör. Dr. Cengiz Görkem DENGİZ nezdinde tüm çalışma arkadaşlarım; Arş. Gör. Fevzi ŞAHİN'e, Arş. Gör. Dr. Erkan ÖZTÜRK'e, Arş. Gör. Dr. Onur YONTAR'a, Arş. Gör. Seyda ÖZBEKTAŞ'a ve Arş. Gör. Mehmet KORKUNÇ'a teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübelerine başvurduğum, hiçbir yardım talebimi geri çevirmeyen ve hiç yüksünmeden yardımına koşan Samsun Üniversitesi Kavak MYO. Öğretim görevlisi Dr. Abdülvahap ÇAKMAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamda kullandığım kimya laboratuvarı imkanlarımı bana sağlayan Doç. Dr. Selim CEYLAN'a ve laboratuvarında çalışmamı kolaylaştırmak için elinden gelen desteği sağlayan Arş. Gör. Gülce ÇAKMAN'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak beni yetiştirip bu günlere gelmemi sağlayan, uzaktan da olsa her daim destekleriyle beni hayata bağlayan, her düştüğümde elimden tutup ayağa kaldıran ve bugünlere gelmemi sağlayan pek kıymetli aileme şükran ve minnetlerimi sunarım.

Gürkan KARA

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. BİYOKÜTLELER VE PİROLİZ.....</b>	<b>3</b>
2.1. Biyokütle .....	3
2.2. Biyokütle Türleri .....	4
2.3. Biyokütlelere Uygulanan Termokimyasal İşlemler .....	6
2.3.1. Yakma .....	6
2.3.2. Sıvılaştırma .....	6
2.3.3. Gazifikasyon .....	6
2.3.4. Piroliz .....	7
2.4. Biyokütle Pirolizinde Elde Edilen Ürünler .....	8
2.4.1. Biyokömür .....	8
2.4.2. Biyoyağ .....	9
2.4.3. Sentetik Gaz .....	10
2.5. Biyokütle Piroliz Verimini Etkileyen Faktörler .....	10
2.5.1. Biyokütle Türü .....	10
2.5.2. Piroliz Prosesi Özellikleri .....	10
2.5.3. Biyokütle Ebatları ve Geometrik Yapıları .....	11
2.5.4. Piroliz Proses Basıncı.....	11
2.5.5. Piroliz Reaktörü Türü.....	11
2.5.6. Katalizör Türü .....	12
<b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>14</b>
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>19</b>
4.1. Biyokütle Kaynağı Olarak Kayısı Çekirdeği Kabuğu.....	19
4.2. Sabit Yataklı Reaktör .....	20
4.3. Biyokütlenin Hazırlanması .....	21
4.4. Piroliz Prosesi.....	23
4.5. Motor Test Düzeneği.....	25
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>30</b>
5.1. Termogravimetrik Analiz(TGA) .....	30
5.2. Biyoyağ Üretimi .....	30
5.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi(FTIR) .....	31
5.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması .....	34
5.5. Pirolitik Biyoyağ Katkılı Motorinin Motor Performans ve Emisyon ve Yanma Karakteristiklerine Etkisi .....	38
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>48</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>51</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$g$	Yer çekimi ivmesi
$n$	Dakikadaki devir sayısı
$l$	Dinamometre yük kolu uzunluğu
$K$	Motor yükü
$P_e$	Efektif güç
$\rho_y$	Yakıt yoğunluğu
$\Delta P_y$	Büretteki basınç farkı
$h_y$	Büretteki yakıt yüksekliği farkı
$V_y$	Yakıtın hacimsel debisi
$A_b$	Büretin kesit alanı
$\dot{m}_y$	Yakıtın kütleli debisi
$b_{e,y}$	Özgül yakıt sarfiyatı
$b_{e,e}$	Özgül enerji sarfiyatı
$H_a$	Yakıtın alt ısı değeri
$\eta$	Efektif verim
ZSM-5	Zeolite Socony Mobil - 5
FAO	Food and Agriculture Organization
TEPGE	Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü
ÜÖN	Üst ölü nokta
AÖN	Alt ölü nokta
M100	Saf motorin
ABSM	Aseton bütanol Span 80 motorin karışımı
P5A3B5M	Pirolitik biyoyakıt aseton bütanol Span 80 motorin karışımı
FTIR	Fourier transform infrared spektroskopisi
ÖYS	Özgül yakıt sarfiyatı
ÖES	Özgül enerji sarfiyatı
$^{\circ}KMA$	Krank mili açısı
ppm	Milyonda bir partikül
PM	Partikül madde emisyonu
HC	Yanmamış hidrokarbon emisyonu
$NO_x$	Azot oksitler

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Biyokütlelere Uygulanan Kimyasal Dönüşümler (Sikarwar, vd., 2017) .....	1
Şekil 2.1. Biyokütle Türleri .....	3
Şekil 2.2. Piroliz İşleminin Şematik Gösterimi(Ndukwu & Horsfall, 2020) .....	7
Şekil 2.3. Biyokütle Pirolizinden Elde Edilen Ürünler .....	8
Şekil 2.4. Selüloz, Hemiselüloz ve Lignin Yapılarının Kimyasal Gösterimi(Tezara, vd., 2016) .....	9
Şekil 2.5. Bazı Piroliz Reaktör Tipleri a)Sabit Yataklı Reaktör b)Akışkan Yataklı Reaktör c)Vakum Piroliz Reaktörü d)Auger Piroliz Reaktörü .....	12
Şekil 4.1. 2018’de Dünyada Üretilen Kayısının Ülkelere Göre Dağılımı (TEPGE, 2020) ...	19
Şekil 4.2. Pirolitik biyoyağ üretiminde kullanılan sabit yataklı piroliz reaktörü ve kısımları 1)İnert gaz giriş hattı 2)Reaksiyon gazları çıkış hattı 3)K-tipi termal çift 4)Reaktör haznesi kapağı 5)Reaktör haznesi 6)Kontrol ve gösterge panelleri 7)Fırın.....	20
Şekil 4.3. Biyokütleri öğütmede kullanılan halkalı öğütücü.....	21
Şekil 4.4. Kayısı Çekirdeği Kabuklarının Öğütme İşleminde Önceki ve Sonraki Boyutları	22
Şekil 4.5. Kurutmada Kullanılan Fırın ve Kurutma Şekli.....	23
Şekil 4.6. Pirolitik Biyoyağ Üretimi İçin Kurulan Piroliz Deney Düzeneği.....	24
Şekil 4.7. Motor Test Düzeneğinin Genel Görünüşü.....	25
Şekil 4.8. TESTO-350 XL Emisyon Ölçüm Cihazı.....	27
Şekil 5.1. Hammaddeye Ait TGA Sonuçları.....	30
Şekil 5.2. Öğütülmüş Kayısı Çekirdeği Kabuklarına Ait FTIR Spektrum Grafiği .....	32
Şekil 5.3. Elde Edilen Biyoyağın Ağır Fazının FTIR Spektrum Grafiği .....	33
Şekil 5.4. Elde Edilen Biyoyağın Hafif Fazının FTIR Spektrum Grafiği .....	33
Şekil 5.5. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar .....	36
Şekil 5.6. Deneylerde Kullanılan Yakıtların Distilasyon Eğrileri.....	37
Şekil 5.7. Test Yakıtlarının CO Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	39
Şekil 5.8. Test yakıtlarının NO Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	40
Şekil 5.10. Test Yakıtlarının NO2 Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	41
Şekil 5.9. Test yakıtlarının NOx Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	41
Şekil 5.11. Test Yakıtlarının Özgül Yakıt Sarfiyatı Değerleri.....	42
Şekil 5.12. Test Yakıtlarının Özgül Enerji Sarfiyatı Değerleri.....	44
Şekil 5.13. Test Yakıtlarının Efektif Verim Değerleri.....	45
Şekil 5.14. Test Yakıtları İçin Tam Yükte Silindir Basınç Değişim Eğrileri.....	46
Şekil 5.15. Test Yakıtları İçin Tam Yükte Net Isı Yayılımı Eğrileri .....	47

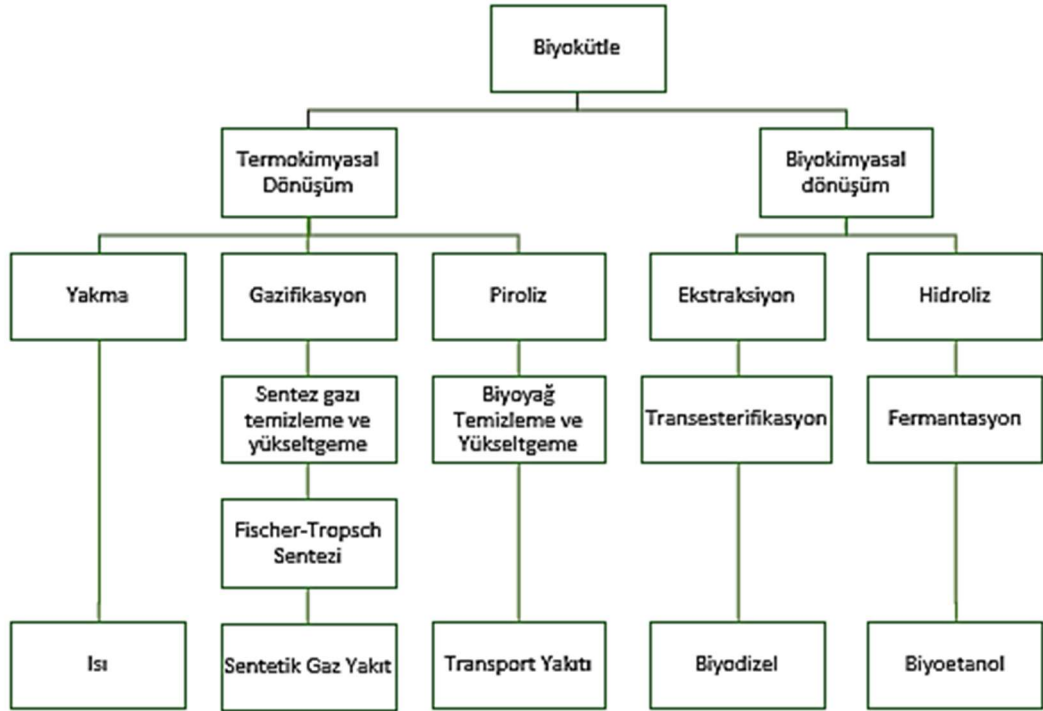
## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Biyokütle Enerjisinin Fosil Yakıtlara Karşı Avantaj ve Dezavantajları (Aslantaş, 2018; Vassilev, vd., 2010).....	4
Tablo 2.2. Biyokütle Türleri ve Kaynakları(Vassilev, vd., 2010; Duku, vd., 2011).....	5
Tablo 4.1. Dünya Yıllara Kuru Kayısı İhracat Miktarı, Bin ton (TEPGE, 2020).....	19
Tablo 4.2. Deney Setindeki Motorun Bazı Teknik Özellikleri .....	26
Tablo 4.3. TESTO-350 XL Emisyon Ölçüm Cihazının Teknik Özellikleri .....	27
Tablo 5.1. Deneylerde Kullanılan Yakıtların Özellikleri.....	36



# 1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtların hızla tükenmesi, fiyat artışı ve yanma sonucu oluşan zararlı emisyonların çevreyi kirletmeleri bilim insanlarını alternatif yakıt arayışına yönlendirmektedir. Bugüne kadar birçok farklı alternatif yakıt denenmiştir. Bunlar alkoller, gaz yakıtlar ve sentetik yakıtlar olarak sınıflandırılmaktadır. Fakat bu yakıtların; bazılarının pahalı olması, bazılarında elde edilen verimlerin düşük olması, depolanabilirliğindeki zorluklar gibi sebeplerden dolayı bu yakıtların hiçbiri, petrolün yerini alamamıştır. Alternatif yakıtların; kaynak ve potansiyel temini, emniyetli olup olmadığı, zehirli ve sağlığa zararlı olup olmadığı, yanma performansı ve emisyonlarına etkisi, depolanabilme özelliği ve kolay temini gibi kriterler açısından incelenmesi gerekir. Farklı biyokütleler kullanılarak üretilen pirolitik yakıtlar, bu kriterlerin birçoğunu sağladığından farklı yakma sistemlerinde yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılabilir alternatif yakıtlardan birisidir. Lignoselülozik biyokütleden üretilen pirolitik biyoyakıtlar, gıda kaynaklarından üretilen pek çok biyoyakıtın(etil alkol, biyodizel v.b.) sınırlayıcı özelliklerini aşma potansiyelindedir(Naik, vd., 2010). Biyokütlelere uygulanan farklı termokimyasal ve biyokimyasal proses türleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir(Sikarwar, vd., 2017).



Şekil 1.1. Biyokütlelere Uygulanan Kimyasal Dönüşümler (Sikarwar, vd., 2017)

Termokimyasal konversiyon, biyokütlenin istenilen ürünlere dönüştürülmesi için en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Piroliz işlemi, ormansal, tarımsal, gıdasal ve şehirsal atıklardan; biyoyağ, biyoçar ve singaz formlarında güvenilir enerji kaynakları sunan, biyokütlelerin genellikle sıvı ürün oluşturma amacıyla oksijensiz ortamda dekompoze edildiği bir termokimyasal prosestir(Basu, 2010; Sikarwar, vd., 2017). Reaksiyon sıcaklığında gerçekleşen bozunmalar sonucu elde edilen buhar, kompleks organik moleküller içeren bir sıvı karışımı oluşturacak şekilde yoğunlaştırılarak hedef ürün elde edilir. Buharlaşamayan gazlar ise genel olarak karbondioksit, karbonmonoksit ve metandır(Demirbas, 2009). En iyi sıvı ürün verimliliği; piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı, biyokütle boyutu gibi pek çok parametreye bağlıdır. Lignoselülozik biyokütlelerin pirolizinde genellikle 500-600 °C arasındaki sıcaklık değerlerinde en iyi sıvı ürün verimliliğine ulaşılır. İşlem sonunda elde edilen sıvı ürün, ek proseslerden geçirilerek biyoyakıt, yakıt katkısına veya farklı kimyasallara dönüştürülebilir(State, vd., 2019). Bu yüksek lisans tezi, giriş hariç 5 ana kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısımda biyokütle enerjisinden, biyokütle kaynaklarından ve biyokütle enerjisi kullanım yöntemlerinden bahsedilmiştir. Alt başlıklar halinde incelenen bu yöntemlerden, teze konu olan piroliz yönteminin detaylı anlatımı yapılmıştır.

İkinci kısımda; literatürdeki selülozik biyokütle pirolizinden biyoyağ eldesi ve pirolitik biyoyağların içten yanmalı motorlarda kullanılması ile alakalı çalışmalar incelenmiş, bu çalışmaların sonuçları (piroliz için proses parametrelerinin etkileri, motor için biyoyağın performans, emisyon ve yanma verilerine etkileri) not edilmiştir.

Üçüncü kısımda; deneysel çalışmalarda kullanılan biyokütle türü olan kayısı çekirdeği kabuğunun dünya ve Türkiye'deki üretimine ve yakıt olarak potansiyeline değinilmiş, piroliz ile yakıt katkısının üretimi ve dizel motorda yakıt katkısı olarak kullanılması şeklinde iki kısımdan oluşan deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar tanıtılmış, deneylerin hangi koşul ve metotlarda gerçekleştirildiği detaylı şekilde anlatılmıştır.

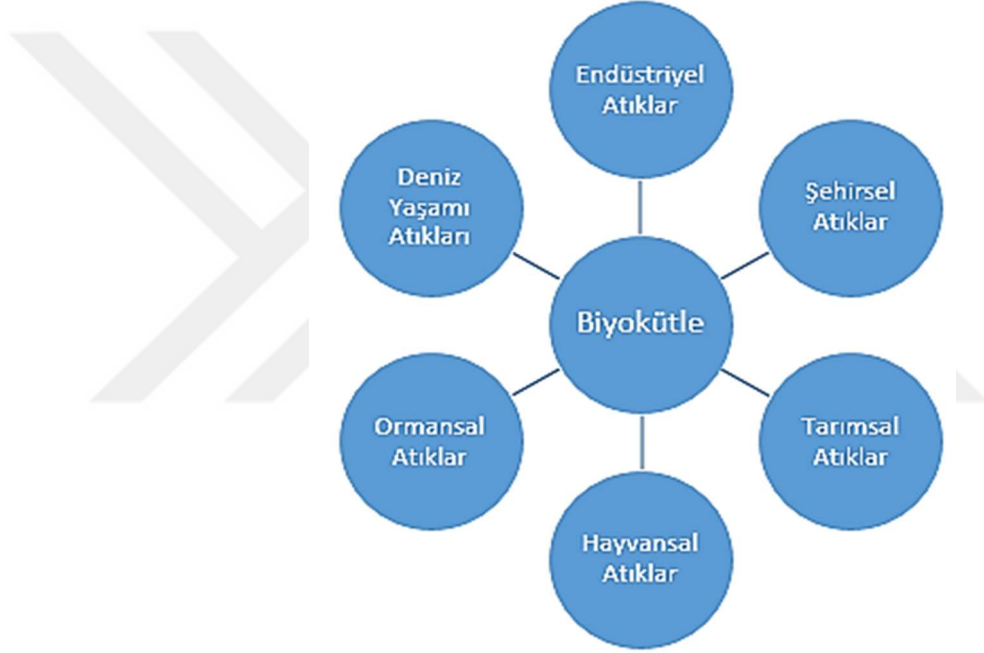
Dördüncü kısımda; elde edilen deney sonuçları paylaşılmış, kendi aralarında karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Beşinci kısımda; elde edilen tüm veriler özet halinde sunulmuş, yapılabilecek potansiyel çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.

## 2. BİYOKÜTLELER VE PİROLİZ

### 2.1. Biyokütle

Biyokütle, karbon temelli yaşam formları kaynaklı tüm maddeleri tanımlamak için kullanılan bir tanımdır. Orman ürünleri, tarımsal ürünler, hayvansal kaynaklar, yosunlar v.b. tüm yaşam kaynaklı ürünler biyokütle rezervini oluşturmaktadır. Biyoküteller temelde güneş ışınlarından alınan enerjinin kimyasal bağlar ile depolandığı organik bileşenlerdir. Yapılarında genel manada karbon, hidrojen, oksijen ve azot ihtiva etmeleriyle birlikte az miktarda kükürte de rastlanmaktadır (Saxena, vd., 2009).



Şekil 2.1. Biyokütle Türleri

İnsanlık tarihi boyunca pek çok alanda enerji kaynağı olarak kullanılan biyokütellerin kullanım alanları, fosil yakıtların keşfi ile daralmıştır. Lakin artan dünya nüfusu ve sanayileşmedeki hızlanma sebebi ile orantılı olarak yükselen enerji ihtiyacı ve dünyanın fosil yakıt rezervlerinin gelecekte bu ihtiyacı karşılayamayacak oluşu, görece olarak daha temiz, temini ucuz ve en önemlisi yenilenebilir olan biyokütle kaynaklarının kullanımı üzerine yapılan çalışmalara hız vermektedir. Biyoküteller; doğrudan yakılmaları yolu ile ısı enerjisine, farklı fiziksel ve kimyasal işlemlerden geçirilmesi yolu ile yakıt ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Aslantaş, 2018; Saxena, vd., 2009).

Biyokütle kaynaklı enerjinin fosil yakıt enerjisine göre üstünlükleri genel olarak; ekonomik olması, temiz olması, kolay ulaşılabilir olması, yenilenebilir olması, kül içeriğinin düşük olması, işleme sırasında oluşan artıkların gübre olarak kullanılabilmesi, atıkların kullanılmasının ekstradan atık yok etme yükünü ortadan kaldırması şeklinde sıralanabilir. Bunların yanında dezavantajları ise; fosil yakıtlara nispeten düşük verim değerlerine sahip olmaları, sabit bir kompozisyona sahip olmadıklarından elde edilen yakıtların özelliklerinin değişken olması, tarımsal biyokütlelerin üretiminin su ayak izini artırması ve toprak verimini düşürme ihtimali olması, tarımsal ve ormansal biyokütle üretimi için yapılan faaliyetlerin doğal yaşam çevresine zarar verme ihtimali olması, biyokütle işleme kuruluşlarının ilk yatırım ve taşıma-depolama maliyetlerinin yüksek olması şeklinde sayılabilir (Aslantaş, 2018; Vassilev, vd., 2010).

Tablo 2.1. Biyokütle Enerjisinin Fosil Yakıtlara Karşı Avantaj ve Dezavantajları(Aslantaş, 2018; Vassilev, vd., 2010)

Avantajları	Dezavantajları
Ekonomik	Düşük ısı verim
Doğa dostu	Değişken ürün kompozisyonu
Kolay ulaşılabilir	Su ayak izi artırma ihtimali
Yenilenebilir	Toprak verimini düşürme ihtimali
Düşük kül içeriği	Doğal yaşama zarar verme ihtimali
İşleme atıklarının işlevselliği	Yüksek ilk yatırım maliyeti
Atık yok etme yükünün olmaması	Yüksek taşıma-depolama maliyeti

## 2.2. Biyokütle Türleri

Biyokütle kavramı, karbon temelli yaşam kaynaklı tüm organik maddeleri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Genel olarak kullanılan biyokütleler; orman ürünleri ve artıkları, şehirsal atıklar, hayvansal gıda işleme atıkları, tarım ürünleri ve artıkları ve deniz yaşamı kaynaklı atıklardır. Bu kaynakların kullanımları, çevresel, ekonomik ve kullanım verimleri özelliklerine göre kendilerine kullanım alanları bulmaktadırlar (Duku, vd., 2011).

Orman ürünleri ve artıkları kaynaklı biyokütleleri; rutin ağaç kesim işlemleri sırasındaki dallar, kökler, oluşan talaş vb. artıklar, ölü çok yıllık otsu bitkiler ve kısa zamanda çok hızlı büyüyebilme potansiyelleri sebebi ile endüstriyel orman ürünü üretimine uygun olan ağaç türleri oluşturmaktadır. Şehirselleme kaynaklı biyokütleleri; evsel kullanım kaynaklı atıklar, sağlık hizmetleri atıkları, kanalizasyon atıkları gibi atıklar oluşturmaktadır (Vassilev, vd., 2010).

Hayvansal gıda işleme atıkları kaynaklı biyokütleler; gıda üretimi için yetiştirilen büyükbaş ve küçükbaş hayvanlar ile kanatlıların dışkıları, kesim sırasında kullanılmayan iç organları, kemikleri ve yağlarından oluşmaktadır. Tarım ürünleri ve artıkları kaynaklı biyokütleleri; hasat sonrasında ve tarımsal gıdanın işlenmesi sırasında kullanılmayan saman, otsu bitki gövdeleri, meyve ve bakliyatların kabukları, bazı ürünlerin yağlı çekirdekleri ve koçanları ile yüksek yağ içerikli bahçe bitkileri oluşturmaktadır. Deniz ürünleri kaynaklı biyokütleler ise; balık yağları ve organları, makro ve mikro boyuttaki tüm algler ve yosun türlerinden oluşmaktadır.

Biyokütle kaynaklı enerji üzerine yapılan çalışmalar genel olarak ulaşım ve taşıma işlerinde kullanılmak üzere fosil kökenli yakıtlara alternatif akaryakıt üretimi üzerinedir. Buna mukabil bu teknolojinin çevresel ve ekonomik etkileri günümüzde hala tartışılmaktadır (Vassilev, vd., 2010).

Tablo 2.2. Biyokütle Türleri ve Kaynakları(Vassilev, vd., 2010; Duku, vd., 2011)

Biyokütle Türü	Kaynaklar
Ormansal Ürünler ve Atıklar	Rutin ağaç kesim ve işleme atıkları, ölü çok yıllık otsu bitkiler, endüstriyel ağaçlar
Şehirselleme Atıklar	Evselleme kullanım kaynaklı atıklar, sağlık hizmetleri atıkları, kanalizasyon çamuru
Hayvansal Ürünler ve Atıklar	Besi hayvanlarının dışkıları, kullanılmayan iç organları, kemikleri ve yağları
Tarımsal Ürünler ve Atıklar	Saman, bitki gövdeleri, meyve ve bakliyat kabukları, yağlı çekirdekler ve koçanlar, yağlı bahçe bitkileri
Deniz Yaşamı Kaynaklı Atıklar	Kullanılmayan balık yağları ve organları, makro ve mikro algler ve yosun türleri

## **2.3. Biyokütlelere Uygulanan Termokimyasal İşlemler**

Biyokütlelerden kullanım alanına ve yöntemine bağlı olarak katı, sıvı ve gaz türlerinde ürünler elde etmek mümkündür. Talep edilen ürün türünün üretilmesinde en iyi verimi sağlayacak termokimyasal teknolojinin kullanılması, biyokütle dönüşümü için önemli bir husustur. Biyokütlelere uygulanan termokimyasal işlemler; yakma, sıvılaştırma, gazifikasyon ve piroliz şeklinde 4 ana başlık olarak irdelenebilir (Basu, 2010).

### **2.3.1. Yakma**

Genel olarak yakma; biyokütlenin ihtiva ettiği hidrokarbonlar ile oksijenin reaksiyona girmesi ile vuku bulan, reaksiyon sonucunda ısı enerjisi, karbondioksit, su ve biyokütlenin içerdiği inklüzyonlara bağlı olarak ortaya çıkan yanma emisyonlarının oluştuğu bir tepkime şeklinde tanımlanır. Yakma işlemi, günümüzde biyokütle kaynaklarının en yaygın olarak değerlendirilme biçimidir. Özellikle fosil yakıtlara erişimin zor olduğu kırsal yerleşimlerde ısınma ve pişirme işlemleri için kullanılmaktadır. Buna ek olarak santrallerde elektrik enerjisi üretimi için de kullanıldığı durumlar vardır (Basu, 2010; Budak, 2017).

### **2.3.2. Sıvılaştırma**

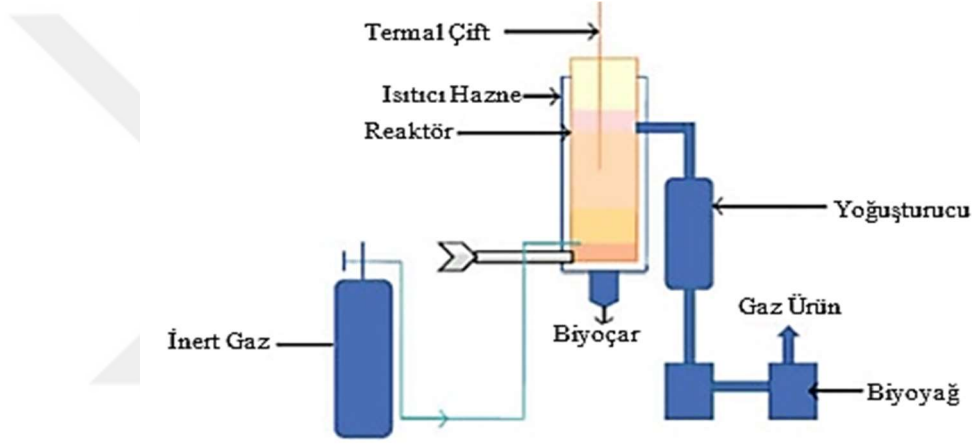
Sıvılaştırma prosesi; biyokütlenin gaz veya sıvı ürünlere hidrotermal parçalama yöntemiyle dönüştürülmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Sıvılaştırma prosesi, diğer termokimyasal proseslerden görece olarak daha düşük sıcaklık değerlerinde ve yüksek basınç ortamında gerçekleştirilir. İşlem sonucunda kısa zincirli kararsız polimerize yapılar ihtiva eden bir biyoyag elde edilir (Basu, 2010).

### **2.3.3. Gazifikasyon**

Gazifikasyon; yüksek sıcaklıklarda (700–1100 °C) ve kontrollü oksijen ortamında bir dizi kimyasal reaksiyon yoluyla sentetik gaz oluşturmak için biyokütlenin termokimyasal bozunması şeklinde tanımlanır. Gazifikasyon işleminin uygulanabilmesi için, biyokütlenin sahip olduğu nem miktarı %35'ten az olmalıdır. İşlem sonunda elde edilen düşük ısı değerine sahip gaz karışımı, direkt olarak yakılabileceği gibi içten veya dıştan yanmalı motorlarda yakıt olarak değerlendirilebilmektedir. Bu gaz karışımı aynı zamanda kimya endüstrisinde farklı kimyasalların imalatında da kullanılabilir (Pandey, vd., 2011).

### 2.3.4. Piroliz

Piroliz işlemi biyokütlelerin genellikle sıvı yada yakıt oluşturma amacıyla oksijensiz ortamda dekompoze edildiği bir termokimyasal proses olarak tanımlanır. Piroliz işleminde gazifikasyondaki kadar yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaz (400-700 °C). Elde edilen buharlar, kompleks organik ve küçük hidrokarbon molekülleri ihtiva eden bir sıvı karışımı oluşturacak biçimde yoğuşturulur. Piroliz işlemi en temel anlamda yavaş piroliz ve hızlı piroliz şeklinde iki farklı türe ayrılır. Yavaş piroliz işlemi, piroliz işleminin katı ürünü olan biyokömür üretim verimini artırırken hızlı piroliz işleminde sıvı ürün olan biyoyağ üretim verimi yüksektir (Pandey, vd., 2011; Ndukwu & Horsfall, 2020).



Şekil 2.2. Piroliz İşleminin Şematik Gösterimi(Ndukwu & Horsfall, 2020)

#### 2.3.4.1. Hızlı Piroliz

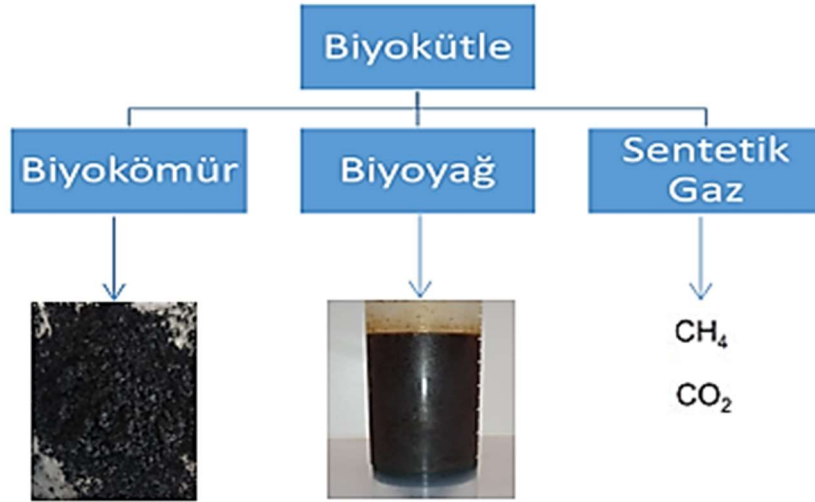
Sıvı ürün elde edilmek istendiği durumlarda kullanılan piroliz türüdür. Biyokütlenin, işlem sıcaklığına çok hızlı şekilde ulaştırılması mantığına dayanmaktadır. Isıtma hızının, biyokütlenin cinsine göre 50-1000 °C/s arasındaki değerlerde olması maksimum sıvı ürün verimliliği sağlamaktadır. Hızlı piroliz prosesinde yüksek ısıtma hızlarının biyokütleyle daha etkili tesir edebilmesi adına biyokütlenin parçacık ebatlarının olabildiğince küçük olması gerekmektedir. Biyokütlenin yapısındaki nem oranı, elde edilen biyoyağın verimini ve kalitesini doğrudan etkileyeceğinden %10 seviyesinden düşük olmalıdır. İşlem sıcaklığının çok yüksek olması durumunda reaktörde ikincil reaksiyonlar oluşacağından yakıt olarak kullanılması düşünülen sıvı ürün eldesi amacıyla yapılan hızlı piroliz işleminde proses sıcaklık değerinin 425-600 °C olması gerekmektedir (Basu, 2013).

### 2.3.4.2. Yavaş Piroliz

Yavaş piroliz işlemi, nihai ürün olarak katı ürün elde edilmek istenen durumlarda kullanılan piroliz türüdür. Asırlardır odun parçalarından kömür üretmek için kullanılan kısmi yanma aşamasındaki kütüklerin toprağa gömülmesi işlemi bir çeşit yavaş piroliz türüdür. Bu yöntem; biyokütlenin görece daha düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 400 °C) ve düşük ısıtma hızlarında uzun süre boyunca termokimyasal bozunması prensibine dayanır. Elde edilen biyokömürün, tarımsal faaliyetlerde kullanılmasının verim artırıcı etkisinin keşfedilmesi ile birlikte bu prosese olan alaka da artmıştır (Basu, 2013).

### 2.4. Biyokütle Pirolizinde Elde Edilen Ürünler

Biyokütlerin piroliz işlemine tabi tutulması sonucunda 3 ana ürün oluşmaktadır. Bu ürünlerin ilki katı ürün olan biyokömür, ikincisi sıvı ürün olan ve değişik organik aromatik bileşenleri ihtiva eden biyoyağ ve üçüncüsü ise sentetik gaz karışımıdır.



Şekil 2.3. Biyokütle Pirolizinden Elde Edilen Ürünler

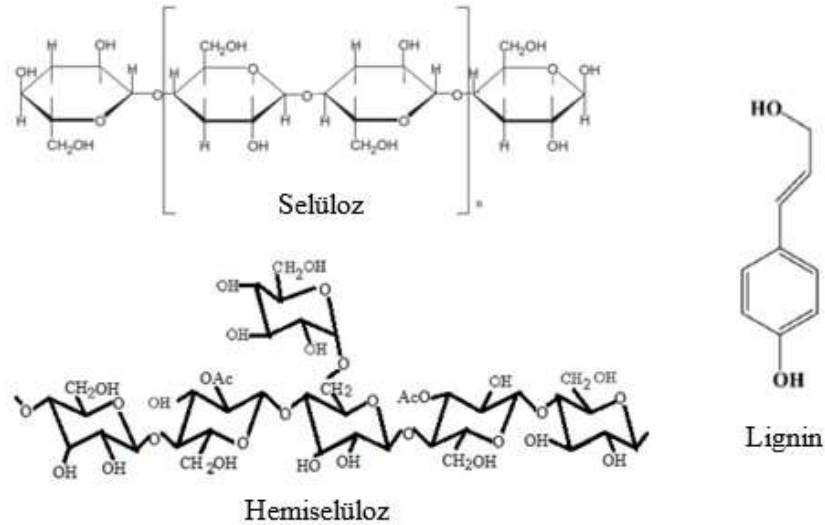
#### 2.4.1. Biyokömür

Biyokömür; biyokütlenin içeriğinin piroliz işleminden sonra geriye kalan dönüştürülmemiş organik katılardan, karbon karasından ve minerallerden oluşan bir üründür. Elde edilen biyokömürün özellikleri, kullanılan biyokütle çeşidine, uygulanan piroliz türüne ve özelliklerine göre değişiklik gösterir. Düşük sıcaklıkta ve yine düşük ısıtma hızlarında uygulanan yavaş piroliz işleminde sıvı ürün verimi düşükken biyokömür verimi yüksektir (Kan, vd., 2016).

Biyokütlerin pirolizi sonucunda elde edilen biyokömür, pek çok alanda kullanılmaktadır. İçeriğindeki yüksek düzeyde organik karbon münasebetiyle uygulandığı tarımsal arazinin üretim verimini artırma potansiyeli yüksektir. Biyokömür üretimi pek çok çevresel katkıda da bulunmaktadır. Çevreye ve doğaya zararlı biyolojik atıkların biyokömür üretiminde kullanılması hem tehlikeli atıkların bertarafına hem de yüksek değerli ürün eldesine olanak sağlar (Ahmad, vd., 2014).

#### 2.4.2. Biyoyağ

Piroliz işleminden elde edilen sıvı ürüne biyoyağ denir. Biyoyağ temelde yüksek oranda oksijen ve su ihtiva eden hidrokarbon karışımlarından oluşmaktadır. Biyokütlenin; selüloz, hemiselüloz ve lignin yapılarının bozunması ile elde edilmektedir (Tezara, vd., 2016). Yüksek sıcaklıklarda ve yüksek ısıtma hızlarında gerçekleştirilen hızlı piroliz işlemi ile optimum biyoyağ üretim verimi sağlanmış olur. Yüksek hızda soğutma uygulaması, sıvı yapısındaki bozunmayı ve farklı reaksiyonları engellediğinden önem arz etmektedir (Basu, 2013).



Şekil 2.4. Selüloz, Hemiselüloz ve Lignin Yapılarının Kimyasal Gösterimi (Tezara, vd., 2016)

Biyokütlerin pirolizi sonucunda elde edilen biyoyağ genel olarak koyu kahverengi, akışkan ve molekül içeriği bakımından orijinal biyokütleyle yakın bir sıvıdır. Biyoyağ farklı renklerde de olabilir. Bu renk farklılığı; biyokütle türü, piroliz yöntemi ve özellikleri, bileşimindeki mikrokarbon içerik düzeyinden kaynaklanmaktadır. Örnek olarak yüksek miktarda azot ihtiva eden biyoyağların rengi yeşile yakındır (Bridgwater, vd., 2015).

Bu şekilde üretilen biyoyağlar çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Biyoyağ,

birtakım işlemlerden geçirilerek; motorlar, türbinler, fırınlar ve kazanlar gibi pek çok yanmalı makinede akaryakıt yerine kullanılabilir. Ayrıca farklı kimyasalların üretiminde yardımcı ürün olarak kullanılabilir. Atık çamurların piroliz işlemine tabi tutulması ile üretilen biyoyağ, herhangi bir işleme ihtiyaç duymadan biyodizel yerine kullanılabilir (Goyal, vd., 2008).

### **2.4.3. Sentetik Gaz**

Piroliz prosesinde yoğunlaştırma aşamasında biyoyağ karışımını oluşturan bileşenler yoğunlaşırken, moleküler ağırlığı düşük olan inklüzyonlar yoğunlaşmaz. Bu yoğunlaşmayan kompleks gaz karışımına sentetik gaz veya sentez gazı denir. Bu sentetik gazın temel bileşenleri; metan, karbondioksit, karbonmonoksit, hidrojen ve nitrojendir. Bu sentez gazı yüksek kalorifik değerleri münasebetiyle gaz yakıtlı makinelerde ve ocaklarda kullanılabilir (Hossain & Davies, 2013).

## **2.5. Biyokütle Piroliz Verimini Etkileyen Faktörler**

Biyokütle pirolizinde ürün elde etme süresini, bileşenlerin oranlarını, kalitesini ürün verimini doğrudan etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler; Biyokütle türü, piroliz özellikleri, biyokütle ebatları ve geometrik yapıları, işlem basıncı, piroliz reaktörü türü ve kullanılan katalizör çeşididir (Sharma, vd., 2015).

### **2.5.1. Biyokütle Türü**

Piroliz ürün miktar oranlarına ve kalitesine doğrudan etki gösteren selüloz, hemiselüloz ve lignin türü bileşenler, biyokütle çeşitlerinde değişen miktarlarda bulunmaktadır. Bu bileşenlerden selüloz ve hemiselüloz, piroliz işlemi sonrasında biyoyağa dönüşürken, lignin bileşeninin bozunması biyokömür ve sentetik gaz üretimini artırır. Biyokütle yapısında bulunan mineraller ise katalizör olarak işlev görmelerinin yanında reaksiyon sonunda biyokömür bünyesinde kalarak biyokömür kalitesini ve verimini artırır. Bu mineraller bazı durumlarda biyoyağın kalitesine olumsuz yönde etki etmektedir (Sharma, vd., 2015).

### **2.5.2. Piroliz Prosesi Özellikleri**

Piroliz prosesinde ısıtma hızı ve reaksiyon sıcaklığı çok önemli parametrelerdir. Yüksek ısıtma hızları, biyoyağın üretim verimini yükseltici etkiye sahiptir. Yüksek ısıtma hızları ile, biyoyağ üretim verimini düşüren ve kalitesini olumsuz etkileyen ikincil reaksiyonların önüne geçilir. İkincil reaksiyonların oluşmasını engellemek için

reaksiyon gazlarının hızlı şekilde soğutulması da gereklidir (Park, vd., 2010).

### **2.5.3. Biyokütle Ebatları ve Geometrik Yapıları**

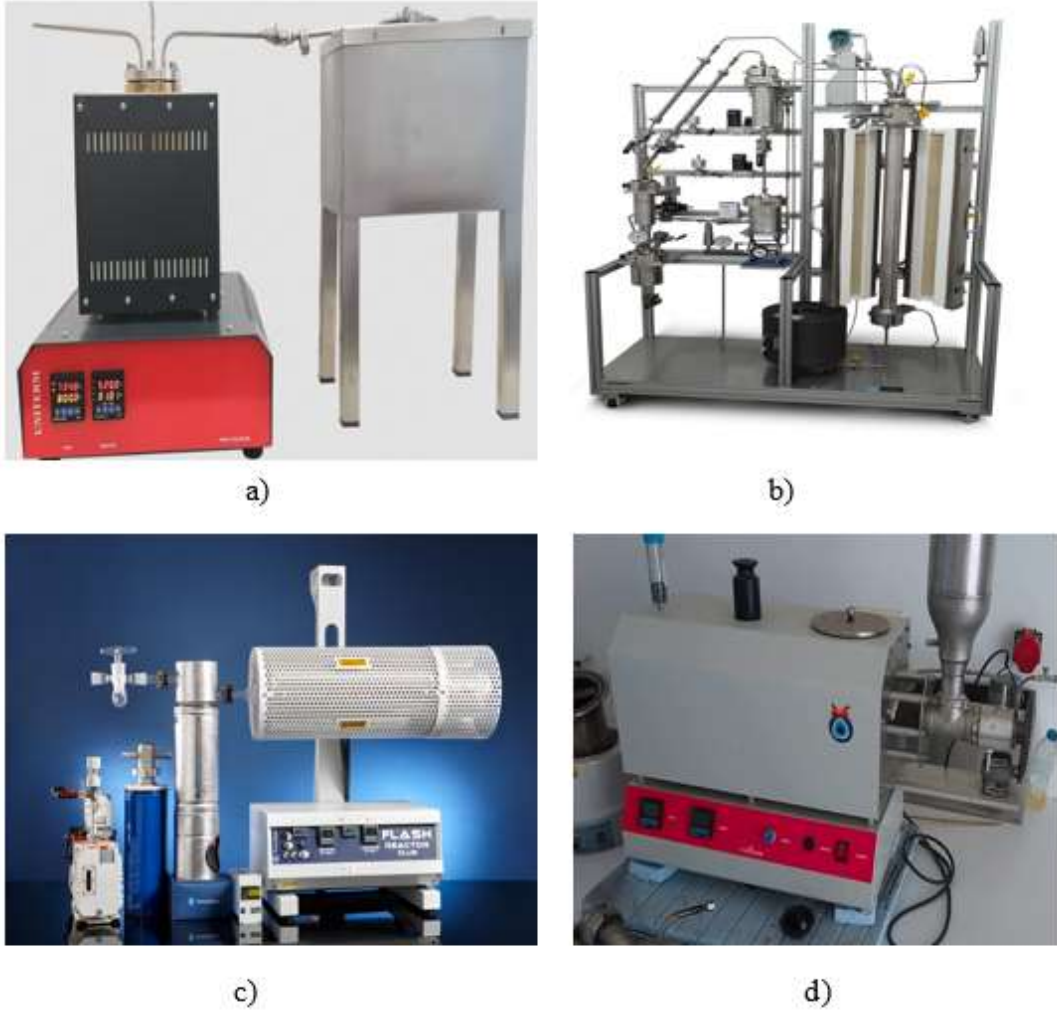
Biyokütlenin pirolizinde ısıtma hızı doğrudan etkili olduğundan, ısının hızlı ve homojen şekilde biyokütlenin her tarafına iletilmesi de çok büyük önem arz etmektedir. Büyük parçacık ebatlarının olduğu durumlarda yüksek ısıtma hızının etkileri parçacık merkezine yakın bölgelerde etkinliğini yitirecektir. Bu da biyoyağ üretim verimini düşürücü yönde rol oynar. Bununla birlikte büyük ebatlar, sıvı ürünlerdeki su miktarını artırarak ürün kalitesini düşürücü etkiye sahiptir. Biyokütle şekilleri de proses verimini etkilemektedir. Parçacık yüzey alanının değişmesi ve farklı şekillerdeki farklı ısı gradyanı yapıları münasebeti ile sıvı verimini olumlu-olumsuz şekilde etkileyebilmektedir (Lu, vd., 2010; Park, vd., 2010).

### **2.5.4. Piroliz Proses Basıncı**

Proses basıncı, piroliz ürün verimi açısından oldukça önemli bir faktördür. Yüksek basınçta uygulanan piroliz işlemlerinde, ikincil reaksiyonların bozunma hızları artmakta ve bu da sıvı verimini düşürerek biyokömür kalitesini ve verimini artırmaktadır. Bunun yanında işlem basıncı daha da yüksek değerlere çıktıkça biyokarbonların karbon tutma kabiliyeti optimum seviyeye yaklaşır (Sharma, vd., 2015).

### **2.5.5. Piroliz Reaktörü Türü**

Parçacıklar arasındaki ısı transfer süreci ürün miktar oranlarına doğrudan etki ettiğinden, seçilen piroliz reaktörü türü de biyokütlenin ayrışma mekanizmalarında önemli etkiye sahip bir faktördür. Örneğin; biyokütleden elde edilmek istenen ürün biyoyağ veya sentetik gaz ise, ısıtma hızının, işlem sıcaklığının ve işlem süresinin optimum ürün verimi sağlayacak şekilde seçilmesi önemlidir. Bunun da birincil yolu doğru reaktörün seçilmesidir. Mevcut teknolojik durumda birçok piroliz reaktör türü bulunmaktadır. Bunlar; akışkan yataklı reaktörler(kabarcıklı veya dolaşım), sabit yataklı reaktörler, dönel konik reaktörler, auger reaktörleri ve vakum piroliz reaktörleri olarak sıralanabilir (Erdoğan, 2018).



Şekil 2.5. Bazı Piroliz Reaktör Tipleri a)Sabit Yataklı Reaktör b)Akışkan Yataklı Reaktör c)Vakum Piroliz Reaktörü d)Auger Piroliz Reaktörü

### 2.5.6. Katalizör Türü

Biyokütle pirolizinde en sık kullanılan katalizör türü zeolitlerdir. Uygulanma alanları çok geniştir ve katalitik aktiviteleri şekilleri ve asiditeleri ile doğrudan ilintilidir. Örneğin ZSM-5 zeolit, oldukça etkili bir deoksidasyon katalizörüdür. Oksijen, zeolit katalizörlüğünde; yüksek sıcaklıklarda karbonmonoksit ve karbondioksit yoluyla, düşük sıcaklıklarda ise su formunda sistemden uzaklaştırılır. Zeolitin katalizör olarak kullanıldığı durumlarda meydana gelen yeniden yapılanma ve kraming mekanizmalarının işleyişleri henüz tam olarak tanımlanamamıştır (Pattiya, vd., 2018).

Katalizörün yüzeyindeki kraming ve ardından zeolit gözeneklerinde aromatiklerin sentezinin gerçekleşmesi şeklinde tarif edilmiştir. Katalizör olarak

ZSM-5 kullanıldığında aromatiklerin ve polisiklik aromatiklerin oluşumunda ikili bir mekanik yolun meydana geldiği öne sürülmüştür (Bridgwater, vd., 2015).

Başlangıçta, katalizör üzerinde düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar (alken gazları v.b.) oluşur ve daha sonra katalizör aromatik bileşikler üretmek için aromatisasyon reaksiyonlarına maruz kalır. Ayrıca, oksijensizleştirme reaksiyonları, alken yolunu kullanmadan doğrudan aromatik bileşikler oluşturabilir (State, vd., 2019).

Diğer sık kullanılan katalizör sınıfı metal oksitlerdir. Sahip oldukları redoks ve asidite özelliklerine göre etkileri değişiklik göstermektedir. Asidik metal oksitler (alüminyum oksit, silisyum oksit), dekarbonilasyon reaksiyonları ile piroliz buharlarını karbonmonoksiti serbest bırakarak oksijensizleştirirken, bazik metal oksitler (magnezyum oksit, kalsiyum oksit) dekarboksilasyon ile karbondioksiti uzaklaştırarak biyoyağdaki oksijen içeriğini azaltır (Pattiya, vd., 2018).

Asidik metal oksitlerin kullanılması, gaz ve katı veriminde bir artış sağlamakla birlikte sıvı veriminde bir azalmaya neden olur. Biyoyağ bileşimi, daha yüksek aromatik hidrokarbon verimi elde etmek için değiştirilebilir. Ayrıca bazik metal oksitler deoksidasyon sırasında daha iyi katalitik aktivite gösterirler. Bununla beraber, bazik metal oksitler, karboksilik asit ve karbonil bileşiklerinin ketonizasyonu ve aldol yoğunlaşması için uygundur. Katalizör olarak kullanılan geçiş metal oksitleri, sıvı organik fraksiyon verimini azaltabilmekte ve gaz, su ve katı verimini artırabilmektedir (Liu, vd., 2014).

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sürekli artan dünya nüfusu, teknolojiadaki hızlı gelişim ve bu gelişimin insan cemiyet yapısında meydana getirdiği sosyal yapı değişikliği, insanlığın enerji ihtiyacını her geçen gün daha da artırmaktadır. Enerji tüketimindeki bu artış ve halihazırda enerji ihtiyacının büyük miktarını karşılayan fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması, bilim camiasını alternatif enerji kaynakları aramaya yöneltmiştir. Biyokütle enerjisi, giriş kısmında da bahsedildiği üzere ulaşımının kolay olması, sürdürülebilir olması ve farklı formlarda farklı yakma sistemlerinde kullanılabilmesi hasebiyle fosil yakıtlar karşısında önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Farklı biyokütle türlerinden piroliz yöntemiyle üretilen biyoyakıtlar, söz konusu enerji açığının kapatılmasında etkili olabileceği düşünüldüğünden, akademik çevrelerce ilgi gören bir çalışma alanı olmuştur.

Bu bölümde, literatürde selülozik biyokütlelerden pirolitik biyoyakıt üretimi ve selülozik biyokütlelerden üretilen biyoyakıtların içten yanmalı motor başta olmak üzere farklı yakma sistemlerinde karışım yakıt veya yakıt katkısı olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları not edilmiştir.

(Abnisa, vd., 2011) yaptıkları çalışmada proses sıcaklığı, biyokütle boyutu, inert gaz akış hızı ve reaksiyon süresi gibi parametrelerin değişiminin palmiye kabuklarının pirolizinden elde edilen biyoyağın verimliliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan palmiye kabukları, 400, 500, 600, 700 ve 800 °C proses sıcaklıklarında, 0,5-0,71 mm, 0,71-0,85 mm, 0,85-1,14 mm, 1,4-1,7 mm ve 1,7-2 mm aralıklarındaki biyokütle boyutlarında, 1, 2, 3, 4 ve 5 l/dk azot gazı debisinde ve 30, 60, 90, 120 ve 150 dakika reaksiyon süresinde piroliz işlemine tabi tutulmuş, değişen parametrelerin sıvı ürün verimliliği üzerine etkilerini kaydetmişlerdir. Proses sıcaklığının etkilerini ölçmek için yaptıkları deneylerde 400 °C den 500 °C'ye çıkıldığında sıvı ürün verimliliğinin %36,8'den %46,1'e çıktığını, sıcaklık 600 °C'nin üstüne çıktığında ise sıvı ürün verimliliğinin %42,9'a düştüğünü ve 800°C'ye yaklaşıldıkça biyoyağ verimliliğinin %35,6'ya kadar gerilediğini saptamışlardır. Biyokütle boyutlarının etkilerini görmek için yaptıkları deneyler sonucunda; 1,4-1,7 mm'ye kadar parçacık boyutları arttıkça sıvı ürün verimliliği artmış, 1,7-2 mm aralığında ise sıvı ürün verimliliğinde çok büyük bir değişim görülmemiştir. İnert gaz akış hızı ile ilgili yaptıkları deneylerde; 1 l/dk debideki azot akışında %40,5 olan sıvı ürün verimliliği, 2 l/dk akış hızına çıkıldığında %5,4 artarak %45,9 olmuş, azot debisi

2 l/dk'nın üzerine çıktığında ise debi arttıkça sıvı ürün verimliliği azalmıştır. Reaksiyon süresinin etkilerini ölçmek için yaptıkları deneylerde ise 60 dakikaya kadar olan reaksiyon sürelerinde süre arttıkça sıvı ürün verimliliğinin arttığını, sonrasında ise neredeyse değişmediğini kaydetmişlerdir.

(Shah, vd., 2021) yaptıkları çalışmada selülozik biyokütle kaynağı olarak seçtikleri atık ceviz kabuklarını sabit yataklı bir piroliz reaktöründe değişen piroliz proses sıcaklıkları, biyokütle boyutları, ısıtma hızları ve inert gaz debilerinde piroliz işlemine tabi tutmuş ve bu parametre değişimlerinin sıvı ürün verimliliğine olan etkilerini incelemişlerdir. Atık ceviz kabuklarına; 375-750 °C arası değişen sıcaklıklarda, 0,5-3 mm arası değişen biyokütle boyutlarında, 10-50 °C/dk arası değişen ısıtma hızlarında ve 0,8-2,5  $cm^3/s$  arası değişen azot gazı debilerinde yaptıkları piroliz deneyleri sonucunda maksimum sıvı ürün verimliliğine 550 °C proses sıcaklığında, 20 °C/dk ısıtma hızında, 1,5-2,5 mm biyokütle boyutlarında ve 1,6  $cm^3/s$  azot gazı debisinde ulaşmışlardır.

(Varma & Mondal, 2018) Çalışmalarında, çam ağacı iğnelerini sabit yataklı bir piroliz reaktöründe farklı piroliz sıcaklıklarında, farklı biyokütle boyutlarında, farklı azot debilerinde ve farklı ısıtma hızlarında piroliz işlemine tabi tutarak, değişen proses parametrelerinin selülozik biyokütlerin pirolizinin ürün verimlilikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda en yüksek sıvı ürün verimliliği değerine; 550 °C proses sıcaklığında, 50 °C/dk ısıtma hızında, 100  $cm^3/dk$  azot gazı debisinde ve 0,6-1 mm hammadde boyutlarında ulaşmış olup bu değeri %43,76 olarak kaydetmişlerdir.

(Yorgun & Yıldız, 2015) Yaptıkları deneyler ile selülozik biyokütellere uygulanan piroliz işlemlerinde değişen reaksiyon parametrelerinin piroliz ürün verimlilikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Selülozik biyokütle kaynağı olarak kullandıkları pavlonya odunu talaşlarını, değişen işlem sıcaklıklarında, ısıtma hızlarında, parçacık boyutlarında ve azot gazı debilerinde sabit yataklı bir piroliz reaktöründe piroliz işlemine tabi tutmuş, elde ettikleri en yüksek sıvı ürün verimliliği olan %54 verimlilik değerine 500 °C piroliz sıcaklığında, 50 °C/dk ısıtma hızında, 0,425-1 mm parçacık boyutlarında ve 100 ml/dk azot gazı debisi değerlerinde ulaşmışlardır.

(Algayyim & Wandel, 2020) alkol yakıtların dizel yakıt katkılarını inceleme amaçlı yaptıkları çalışmada, ürettikleri farklı oranlarda bütanol-aseton-dizel karışımlarını tek silindirli dizel test motorunda yakıt olarak kullanmış, bu katkıların motor performans, emisyon ve yanma karakteristikleri üzerine etkilerini incelemiştirlerdir. Çalışmalarında ilk etapta Bütanol ve asetonu 2,9:1 oranında karıştırmış, daha sonra elde ettikleri alkol karışımını, toplam karışımın %10'u ve %20'si olacak şekilde motorin ile karıştırıp test yakıtlarını elde etmişlerdir. Deneyleri sonucunda her iki karışımın da özgül yakıt tüketimini ve termal verimi artırdığını, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını azalttığını, değişken devirlerde motor gücünü neredeyse değiştirmedeğini saptamışlardır.

(Chiaromonti, vd., 2004) yaptıkları çalışmada ürettikleri pirolitik biyoyağı motorin ile homojen olarak karıştırılabilmek için farklı sürfaktanlar kullanarak deneyler yapmışlardır. Deneylerinde farklı özelliklerdeki (anyonik-katyonik, iyonik-iyonik olmayan gibi) 77 farklı yüzey aktif maddeyi ayrı ayrı oranlarda motorin ile karıştırmış, elde ettikleri karışımların stabilitelelerini kaydetmişlerdir. Denemeler sonucunda en yüksek stabilite değerini Atlox 4912 ile 7 gün olarak ölçerlerken Span 80 için stabilite değerini 1 gün olarak ölçmüşlerdir.

(Laesecke, vd., 2017) yaptıkları çalışmada, selülozik biyokütle kaynağı olarak kullandıkları yumuşak ağaç atıklarından pirolitik biyoyağ elde etmiş ve bu biyoyağın dizel motorda kullanılmasının termodinamik ve emisyon performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Biyokütle kaynağı olarak kullandıkları yumuşak ağaç peletlerini, akışkan yataklı piroliz reaktöründe, azot ortamında ve 500 °C reaksiyon sıcaklığında piroliz işlemine tabi tutarak kütleli olarak hammaddenin %31'ine tekabül edecek oranda sıvı ürün elde etmişlerdir. Sonrasında elde ettikleri bu sıvı ürünü, biyodizel ile 80:20 ve 60:40 biyodizel:biyoyağ oranlarında karıştırarak tabii emişli tek silindirli bir 4 zamanlı dizel motorda yakıt olarak kullanıp, sonuçlarını not etmişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda karışım içindeki pirolitik biyoyağ oranının artmasıyla; tutuşma gecikmesinin arttığı, yanma süresinin ve özgül yakıt tüketiminin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte PM emisyonlarında %30-53, Yanmamış HC emisyonlarında %56-75, CO emisyonlarında %24-52 artış tespit edilirken NO<sub>x</sub> emisyonlarında %21-24 azalma görülmüştür. Dinamometreden alınan motor gücü değerlerinde ise %11 azalma kaydedilmiştir.

(Thamizhvel, vd., 2021) Çalışmalarında hindistan cevizi kabuklarından piroliz ile biyoyağ elde etmiş ve bu biyoyağı motorin ile karıştırıp dizel motorda yakıt olarak kullanarak selülozik biyokütlelerden elde edilmiş pirolitik biyoyağların motor yakıtı olarak kullanılabilme potansiyelleri hakkında fikir edinmeyi amaçlamışlardır. Deneyle sonucunda motorin-biyoyağ karışımının saf motorine göre; PM, CO, HC ve artan yüklerdeki NO<sub>x</sub> emisyonlarını azalttığı, termal verimi artırdığı ve yakıt tüketimini neredeyse değiştirmediğini kaydetmişlerdir.

(Gunasekar, vd., 2021) Selülozik biyokütle kaynaklı pirolitik biyoyağların dizel motor yakıtı olarak kullanılmasının motor performans ve emisyonlarına etkilediklerini inceledikleri çalışmalarında biyokütle kaynağı olarak atık hindistan cevizi kabuklarını kullanmışlardır. Elde ettikleri biyoyağı %10 ve %20 oranlarında motorin ile karıştırarak dizel motorda yakıt olarak kullanmış, deneyle sonucunda; HC, NO<sub>x</sub>, CO, PM emisyonlarının ve termal verimin saf dizel yakıt kullanılan duruma göre azaldığını, özgül yakıt tüketiminin ve egzoz gazı sıcaklığının arttığını tespit etmişlerdir.

(Yang, vd., 2014) yaptıkları deneylelerde; kahve çekirdeği atıklarından elde ettikleri pirolitik biyoyağı, %5 ve %10 oranlarında motorin ile karıştırıp dizel motor yakıtı olarak kullanmış, biyoyağın dizel yakıt katkısı olarak kullanılmasının motor performans ve emisyon parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda biyoyağ –motorin karışımının kullanıldığı durumlarda saf motorin kullanılan durumlara göre CO, NO<sub>x</sub> emisyonlarının ve indike termal verimin azalırken, PM emisyonlarının ve egzoz gazı sıcaklığının arttığını gözlemlemişlerdir.

Sonuç olarak, literatürde farklı biyokütlelerden piroliz yoluyla katı, sıvı ve gaz yakıt eldesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ekserisi piroliz parametrelerinin etkilerinin incelenmesi, optimizasyonu ve elde edilen ürünlerin karakterizasyonuna yöneliktir. Özellikle piroliz sonucu elde edilen sıvı yakıtların dizel motorlarda kullanım olanaklarının araştırıldığı sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan örnek olarak seçilen bazıları bu bölümde verilmiş olup, örnek olarak verilen ve verilmeyen pek çok çalışmadan alınan verilere göre bu çalışmada yapılan deneylelerde kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Piroliz sonucu elde edilen sıvı yakıtın viskozitesinin ve yoğunluğunun yüksek olması, ısıl değerinin düşük olması, yüksek asitlik derecesine sahip olması gibi olumsuz özelliklerinin bu yakıtların dizel motorlarda kullanımını sınırladığı literatürdeki pek çok çalışmadaki sonuçlardan anlaşılmaktadır. Ayrıca, pirolitik biyoyağın, piroliz

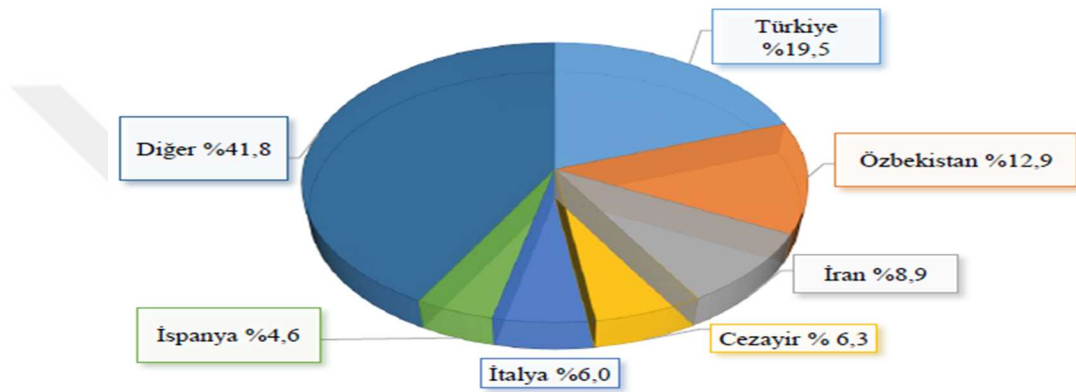
işleminde kullanılan sistemlerden kaynaklı biyokütle tortuları barındırması, viskoz yapısı ve yüzey gerilim farklılıkları nedeniyle motorin ile doğrudan karıştırılarak dizel motorlarda kullanılmasında da belirli zorluklar bulunmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, literatürden farklı olarak, çeşitli çözücü ve yüzey aktif maddeler kullanılarak, pirolitik biyoyağın belirli bir oranda motorin ile karıştırılarak kullanım olanaklarının araştırılması üzerinde durulmuştur. Bu kapsamda, elde edilen karışımların tek silindirli bir dizel test motorunda motor performans, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyon testleri tatbik edilerek elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.



## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Biyokütle Kaynağı Olarak Kayısı Çekirdeği Kabuğu

Kayısı; anavatanı Orta Asya, Batı Çin ve İran-Kafkasya olan, başta Akdeniz ülkeleri olmak üzere, birçok ülkede ekonomik olarak yetiştiriciliği yapılan tek çekirdekli bir meyve türüdür. Dünya Gıda Örgütü (FAO) verilerine göre, 2018 yılında yaklaşık 549 bin hektar alanda 3,8 milyon ton kayısı üretimi gerçekleşmiştir. Türkiye hem kayısı üretimde alanında hem de üretim miktarında dünyada birinci sırada yer almakta olup kendine yeterlilik düzeyi %350'dir.(TEPGE, 2020)



Şekil 4.1. 2018'de Dünyada Üretilen Kayısının Ülkelere Göre Dağılımı (TEPGE, 2020)

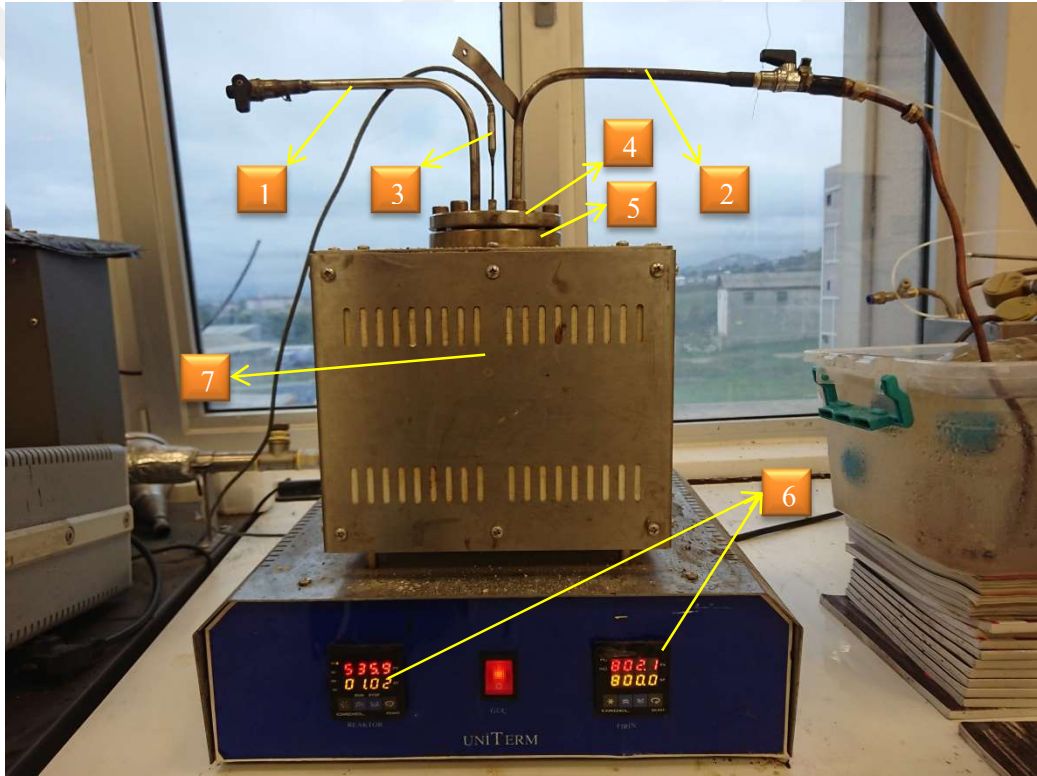
TÜİK(Türkiye İstatistik Kurumu) 2019 yılı verilerine göre Türkiye'de 814 bin ton kayısı imalatı yapılmıştır. Yine FAO'nun verilerine göre bu sayı tüm dünyadaki kayısı üretiminin %19,9'una tekabül etmektedir. Ülkemizdeki kayısı üretiminin çok büyük bir kısmını karşılayan Malatya ilinde yetiştirilen kayısının yaklaşık %90'ı kuru kayısı üretiminde kullanılmaktadır. Bu da iç tohumu kuruyemiş olarak tüketilen kayısı çekirdeğinin kabuklarının ciddi bir tarımsal atık kaynağı olmasına neden olur.(TEPGE, 2020)

Tablo 4.1. Dünya Yıllara Kuru Kayısı İhracat Miktarı, Bin ton (TEPGE, 2020)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Türkiye	93	90	102	112	78	65	79	95	94	100
Özbekistan	0	0	0	0	0	0	0	11	7	9
Kırgızistan	1	0	0	0	1	0	0	3	4	9
Tacikistan	0	0	0	0	36	20	21	16	11	8
İspanya	1	0	1	2	2	2	2	2	5	2
Hollanda	2	2	1	1	2	1	1	1	2	2
Fransa	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2
Almanya	2	2	2	3	2	2	1	1	1	1

## 4.2. Sabit Yataklı Reaktör

Bu çalışmada piroliz reaktörü olarak Şekil 4.2’de gösterilen, OMÜ Kenevir Araştırmaları Enstitüsü bünyesindeki Yenilenebilir Enerji Araştırma Laboratuvarı envanterinde bulunan UNİTERM markalı sabit yataklı reaktör kullanılmıştır. Konvansiyonel ısıtma sistemine sahip olan bu reaktör 800 °C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Reaktör haznesi DIN 1.4401 paslanmaz çelikten imal edilmiş olup 100 ml iç hacme sahiptir. Hazne-hazne kapağı bağlantısı, yüksek sıcaklık contası ihtiva eden flanşlı bağlantı ile sağlanmakla birlikte, montajlı halde reaktörün fırın kısmına direkt olarak yerleştirilebilir olup herhangi bir bağlantı elemanı kullanılmamaktadır.



Şekil 4.2. Pirolitik biyoyağ üretiminde kullanılan sabit yataklı piroliz reaktörü ve kısımları  
1)İnert gaz giriş hattı 2)Reaksiyon gazları çıkış hattı 3)K-tipi termal çift 4)Reaktör haznesi kapağı 5)Reaktör haznesi 6)Kontrol ve gösterge panelleri 7)Fırın

Reaktör iç sıcaklığı, reaktör kapağında hazne içine kadar uzanan kapalı kanal içerisine yerleştirilen K-tipi termal çift ile ölçülmektedir. Reaksiyon sıcaklığı, ısıtma hızı, reaksiyon adımları, reaksiyon süresi gibi parametreler, ön panelde bulunan dijital göstergelerden ayarlanabilmekte ve takip edilebilmektedir. Reaktör haznesinin, kapak üzerine yerleştirilmiş vaziyette 2 adet çıkışı vardır. Bu çıkışlardan biri inert gaz ortamı oluşturmak ve içerideki havayı süpürmek için kullanılan gazın girişini sağlama amaçlı olup, diğeri reaksiyon gazlarını yoğuşurma düzeneğine iletme amaçlıdır. Bu çalışmada uygulanan reaksiyon yöntemi gereği bahsedilen giriş ve çıkışlara gaz vanası monte edilerek gaz giriş çıkışı reaktör üzerinden kontrol edilebilir hale getirilmiştir.

#### 4.3. Biyokütlenin Hazırlanması

Biyokütle olarak kullanılan kayısı çekirdeği kabukları, piroliz sonucu olarak yüksek sıvı ürün verimliliği ve ürün kalitesi istenen durumlarda, boyutlarının büyüklüğü ve içerdikleri nem münasebeti ile hasat sonrasındaki şekilleriyle kullanılamazlar. Bu sebeple reaksiyonda kullanılan kayısı çekirdeği kabuklarına ilk etapta öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme işlemi için Şekil 4.3'te görülen ÜNAL marka halkalı öğütücü kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Biyokütleri öğütmede kullanılan halkalı öğütücü

Bu öğütücü, kapağı kapalı silindirik paslanmaz çelik bir hazne içerisine yine paslanmaz çelik bir silindir yerleştirilip, öğütülmek istenen malzemeleri kalan boşluklara doldurduktan sonra haznenin hızlı şekilde çalkalanması ile öğütülmek istenilen malzemeye güçlü darbeler vurarak parça boyutlarını küçültme prensibine göre çalışmaktadır. Kayısı çekirdeği kabukları, her seferde 50 gr olacak şekilde tartılarak öğütücüye yerleştirilip, her öğütme işlemi 3 dakika olacak şekilde ayarlanarak parça boyutları 1 mm'nin altında olana kadar öğütülmüştür. Öğütme işlemi sırasında öğütücünün çalışma prensibi gereği öğütme haznesi yüksek sıcaklıklara çıkabildiği ve bu da ürünün bir kısmının yanmasına sebep olabildiği için her öğütme işlemi sonrasında hazne, hazne kapağı ve koç, su içerisinde soğutulup kurutulduktan sonra tekrar kullanıma geçilmiştir.



Şekil 4.4. Kayısı Çekirdeği Kabuklarının Öğütme İşleminde Önceki ve Sonraki Boyutları

Öğütülen kayısı çekirdeği kabukları, reaksiyon öncesinde bünyelerinde ihtiva ettikleri nemin uzaklaştırılması için Şekil 4.5'te gösterilen MİKROTEST MST-55 marka kurutma fırınında kurutulmuştur. Kayısı çekirdeği kabuk tozları, hassas terazide tartılarak küçük cam tabaklar içerisine konulmuş, 60 °C sıcaklık ayarlı kurutma fırınında 15 saat kurutma işlemine tabi tutulduktan sonra yeniden tartılarak kütle içerisindeki nem oranı not edilmiştir.



Şekil 4.5. Kurutmada Kullanılan Fırın ve Kurutma Şekli

#### 4.4. Piroliz Prosesi

Piroliz prosesinde kullanılan düzenek Şekil 4.6’da verilmiştir. Bölüm 4.2’de detaylı olarak anlatımı yapılan sabit yataklı piroliz reaktörünün gaz çıkış hattına, bakır borudan bükülerek imal edilen 7 mm çapındaki yoğunlaştırma sarmalı, metal ve plastik kelepçeler ile sızdırmazlığı sağlayacak şekilde bağlanmıştır. Yoğunlaştırma sarmalı, içi su dolu 10 lt hacimli plastik kabın içerisine daldırılmış, soğutma suyu sıcaklığının sürekli düşük tutulabilmesi için kabın içerisine içi buz dolu şişeler yerleştirilmiştir. Bakır boru çıkışı, plastik hortum ile reaksiyon sonucu oluşan biyoyağın birikeceği 1 numaralı gaz yıkama şişesinin giriş hattına bağlanmıştır. 1 numaralı gaz yıkama şişesinin çıkış hattı ise, yoğunlaştırucuda tam yoğunlaşamayan yoğunlaşabilir gazların son çıkış hattında yoğunlaşarak sistemdeki akış düzenini etkilemesini engelleyen ve reaksiyon başlangıcında gaz çıkışının başlayıp başlamadığının görülmesini sağlayan içi soğuk su dolu 2 numaralı gaz yıkama şişesinin giriş hattına bağlanmıştır. 2 numaralı gaz yıkama şişesinin çıkış hattı, plastik gaz borusu ile yoğunlaştırılmayan reaksiyon gazlarının uzaklaştırılması için doğrudan atmosfere verilmiştir.



Şekil 4.6. Pirolitik Biyoyeğ Üretimi İçin Kurulan Piroliz Deney Düzenegi

Öğütülmüş ve nemi uzaklaştırılmış olan kayısı çekirdeği kabukları, hassas terazi ile 75 gram olacak şekilde tartılıp reaktör haznesinin içine yerleştirilmiştir. Sonrasında reaktör contasının sağlamlığı kontrol edilerek reaktör kapağı kapatılmış, flanş cıvataları yüksek torklarda sıkılmıştır. Hazne, reaktörün fırın bölgesindeki yerine yerleştirilmiş, gaz giriş ve çıkış hatlarının bağlantıları sağlanmıştır. İnert gaz olarak kullanılan azot, reaktör girişinden düşük debiyle verilerek hazne içerisindeki hava tamamen süpürülmüş ve sistem reaksiyona hazır hale getirilmiştir. Literatürden edinilen bilgiler ışığında reaktör haznesi iç sıcaklığı 550 °C olacak şekilde kontrol paneline komut girişi yapılmış, proses başlatılmıştır. Parlak beyaz renkli piroliz gazı 1 numaralı şişede görülene kadar düşük debili azot akışı sürdürülmüş, piroliz gazı görüldüğü anda azot akışı kesilerek reaksiyon tabii akış rejimine bırakılmıştır. Reaksiyon tamamen sonlandıktan sonra elde edilen sıvı ürün ve haznede kalan biyokömür hassas tartıda tartılmış, reaksiyon öncesi hammadde ağırlığıyla kıyaslanarak katı, sıvı ve gaz ürünlerin kütlece verimliliği hesaplanmıştır. Sonrasında reaktör elemanları temizlenerek bir sonraki reaksiyona hazır hale getirilmiştir. Bu anlatılanlar her reaksiyon için ayrı ayrı tekrar edilmiştir.

#### 4.5. Motor Test Düzenegi

Bu çalışmada motor test düzenegi olarak Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Motorlar ve Makine Teorisi Laboratuvarı envanterinde bulunan APEX INNOVATIONS marka motor araştırma-test ünitesi kullanılmıştır. Bu test ünitesi; tek silindirli 4 zamanlı değişken sıkıştırma oranlı dizel test motoru, Eddy akımı motor dinamometresi, 0-50 kg hassasiyetli yük hücresi, 2 adet rotametre, yakıt debisi ölçüm ünitesi, sıcaklık ve bağlı nem ölçüm tertibatı, egzoz kalorimetresi, basınç transmitterleri, mil dönel kodlayıcısı, silindir basınç sensörü, termal çiftler, veri toplayıcı, kontrol ünitesi ve bilgisayar ihtiva etmektedir. Deney düzeneginin görünüşü Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Motor Test Düzeneginin Genel Görünüşü

Motor performans ve emisyon deneylerinin yapıldığı deney setinde bulunan dizel motor; dört zamanlı, değişken sıkıştırma oranlı ve değişken püskürtme avanslı, direkt püskürtmeli ve su soğutmalı bir motordur. Motorun yakıt sistemi; yakıt tankı, yakıt boruları, 2 adet yakıt ara filtresi, tek pistonlu yakıt pompası, santrifüj tip regülatör ve enjektörden oluşmaktadır. Deney motorunun özellikleri Tablo 4.2’de belirtilmiştir.

Tablo 4.2. Deney Setindeki Motorun Bazı Teknik Özellikleri

Marka/Model	Kirloskar/TV 1
Silindir sayısı	1
Silindir çapı/strok	87,5 mm/110mm
Strok hacmi	661.45 cc
Sıkıştırma oranı	12:1-18:1
Standart sıkıştırma oranı	17,5:1
Devir sayısı	1500 d/dk, sabit
Maksimum döndürme momenti	21,8 Nm @ 1500 d/dk.
Maksimum efektif güç	3,5 kW @ 1500 d/dk.
Püskürtme avansı	0-25 °KMA ÜÖN’den önce
Standart püskürtme avansı	23 °KMA ÜÖN’den önce
Püskürtme basıncı	200 bar
Enjektör memesi delik sayısı/çapı	3/0,24 mm
Emme supabı açılma avansı	4,5° KMA ÜÖN’den önce
Emme supabı kapanma gecikmesi	35,5° KMA AÖN’den sonra
Egzoz supabı açılma avansı	35,5° KMA AÖN’den önce
Egzoz supabı kapanma gecikmesi	4,5° KMA ÜÖN’den sonra

Deney motorunun gerekli test yüklerinde yüklenebilmesi için Eddy akım dinamometresi kullanılmıştır. Deney setindeki Eddy akım dinamometresi, motor miline akuple edilmiş bir rotor, rotorun etrafına serbest olarak yataklanmış stator, yük ayarı için dimmer devresi, yük kolu, yük hücresi ve dijital yük gösterge ekranından oluşmaktadır. Rotor, motordan gelen tork ile döner iken, stator sargılarına doğru akım kaynaklı bir gerilim verilir ve stator sargılarında manyetik akı oluşması sağlanır. Oluşan bu akı, rotorun dönmesi ile kesilir ve bu durumda manyetik akıdaki değişime bağlı olarak stator sargılarında Eddy akımı indüklenir. Oluşan bu Eddy akımı, stator sargılarında rotorun dönüş yönünün zıttı bir yönde manyetik akı meydana getirir ve rotorun hareketine karşı bir direnç oluşmuş olur. Bu direnç, stator gövdesine bağlanmış olan yük kolu vasıtası ile yük hücresine bir kuvvet uygular. Dinamometrenin motor

miline uyguladığı yük, stator sargılarına uygulanan gerilimin dimmer devresi kullanılarak değiştirilmesi ile ayarlanmaktadır.

Kullanılan yakıtların CO, NO, NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> egzoz emisyon değerleri, Şekil 4.8'deki TESTO-350 XL egzoz gazı analiz cihazı ile yapılmıştır. Cihazın bazı teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.8. TESTO-350 XL Emisyon Ölçüm Cihazı

Tablo 4.3. TESTO-350 XL Emisyon Ölçüm Cihazının Teknik Özellikleri

Özellik/Gaz	CO	NO	NO <sub>2</sub>
Ölçüm aralığı	0-10000 ppm	0-3000 ppm	0-500 ppm
Duyarlılık	1 ppm	1 ppm	0,1 ppm
Doğruluk	±10 ppm	±5 ppm	±5 ppm

Çalışmada kullanılan M100, ABMS ve P5A3B5M yakıtlarının her biri için motor testi yapılmıştır. Yakıtlar, Bölüm 5.4.'de detaylı anlatıldığı şekilde hazırlanıp, önceden boşaltılıp temizlenmiş olan yakıt tankına doldurulmuştur. Deney setinin çalıştırma öncesi kontrolleri tamamlanıp motor çalıştırılmış, yakıt borularındaki önceki deneylerden kalma yakıtlar tamamen tükenene ve motor yeni koyulan yakıtla çalışmasında rejim durumuna gelene kadar beklenip sonrasında deney prosedürlerine başlanmıştır. Motor deneyleri, test motorunun 1/4, 2/4, 3/4 ve tam yük koşullarına tekabül eden 3, 6, 9 ve 12 kg dinamometre yüklerinde yapılmıştır. Kontrol paneli üzerindeki dimmer anahtarından motor yükü, sırası gelen ölçüm yüküne ayarlanmış, motor söz konusu yükte çalışma rejimine gelene kadar beklenmiş ve sonrasında deney

setinin bilgisayar yazılımı üzerinden performans ve yanma verileri, emisyon ölçüm cihazının ekranından da egzoz gazı verileri alınmaya başlanmıştır. Her performans ve yanma verisi için farklı döngü sayılarında 90 saniye aralıklarla 4'er ölçüm, emisyon değerleri için ise 60 saniye aralıklı olarak 6'şar ölçüm yapılmış, alınan verilerin aritmetik ortalaması hesaplanarak söz konusu koşullardaki ortalama yanma, performans ve emisyon değerleri kaydedilmiştir. 4 motor yükü değerinde de ölçümleri tamamlanan test yakıtı, yakıt tankından boşaltılarak bir sonraki yakıt tanka doldurulmuştur. Tüm bu işlemler 3 yakıt için de ayrı ayrı tekrar edilmiş olup, ölçümler tamamlandıktan sonra elde edilen veriler, performans parametrelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Efektif gücün hesaplanması için motor torkunun bilinmesi gereklidir.  $T$  (Nm) motor torku;  $l$  (m) dinamometre yük kolu uzunluğu,  $K$  (kg) motor yükü ve  $g$  ( $m/s^2$ ) yer çekimi ivmesi değerleri denklem (4.1)'de yerlerine yazılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan motor torku ve  $n$  (dev/dk) motor devri değerleri denklem (4.2)'de yerlerine yazılarak  $P_e$  (kW) efektif güç değeri hesaplanmıştır.

$$T=l \times K \times g \quad (\text{Nm}) \quad (4.1)$$

$$P_e=T \times (2\pi n/60) \quad (\text{kW}) \quad (4.2)$$

Yakıt sarfiyatının tespiti, deney tesisatındaki yakıt ölçüm büreti ve büretin altına yerleştirilmiş olan basınç sensörü vasıtasıyla yapılmıştır. Deney sırasında büret yakıtla doldurulmuş ve sistemdeki vana kombinasyonları değiştirilerek motorun yakıt tüketiminin sadece yakıt büretinden karşılanması sağlanmıştır. Yakıt büretinin tabanındaki basınç sensörü yardımıyla belirlenen zaman aralıklarındaki basınç değişimi gözlemlenmiş, büret kesiti, yakıt yoğunluğu ve basınç farkı bilindiğinden yakıt sarfiyatı, (4.3), (4.4) ve (4.5) denklemlerinden hesaplanmıştır.

$$\Delta P_y = \rho_y g h_y \quad (4.3)$$

$$V_y = h_y A_b / \Delta t \quad (\text{ml/s}) \quad (4.4)$$

$$m_y = V_y \cdot \rho_y \times 3.6 \quad (\text{kg/h}) \quad (4.5)$$

Bu denklemlerde;  $\Delta P_y$  (Pa) büretteki basınç farkı,  $\rho_y$  (g/ml) test yakıtının yoğunluğu,  $h_y$  (mm) ölçüm zaman aralığında yakıt büretindeki yükseklik değişimi,  $V_y$

(ml/s) yakıtın hacimsel debisi,  $A_b$  (mm<sup>2</sup>) bürerin kesit alanı,  $m_y$  (kg/h) ise yakıtın kütleli debisidir.

Özgül yakıt sarfiyatı değeri ( $b_{e,y}$ ), birim zamanda üretilen efektif güç başına harcanan yakıtı gösterir bir parametredir ve  $m_y$  kütleli yakıt debi değeri ve  $P_e$  efektif güç değeri denklemin (4.6)'da yerine yazılmasıyla hesaplanmıştır.

$$b_{e,y} = \dot{m}_y / P_e \quad (\text{MJ/kWh}) \quad (4.6)$$

Kullanılan deney yakıtlarının birbiri arasında daha anlamlı kıyaslanabilmesi için motorun özgül enerji tüketiminin de hesaplanması iktiza eder. Özgül enerji tüketimi ( $b_{e,e}$ ),  $m_y$  kütleli yakıt debi değeri ve  $P_e$  efektif güç değeri ve  $H_a$  deney yakıtının alt ısı değeri (MJ/kg) denklemin (4.7)'de yerlerine yazılması ile hesaplanmıştır.

$$b_{e,e} = \dot{m}_y H_a / P_e \quad (\text{g/kWh}) \quad (4.7)$$

Motor efektif verimi ( $\eta$ ), yanma odasına giren yakıt enerjisinin ne kadarının efektif güce dönüştüğünün ölçüsüdür ve ilgili değerlerin denklemin (4.8)'de yerlerine yazılması ile hesaplanır.

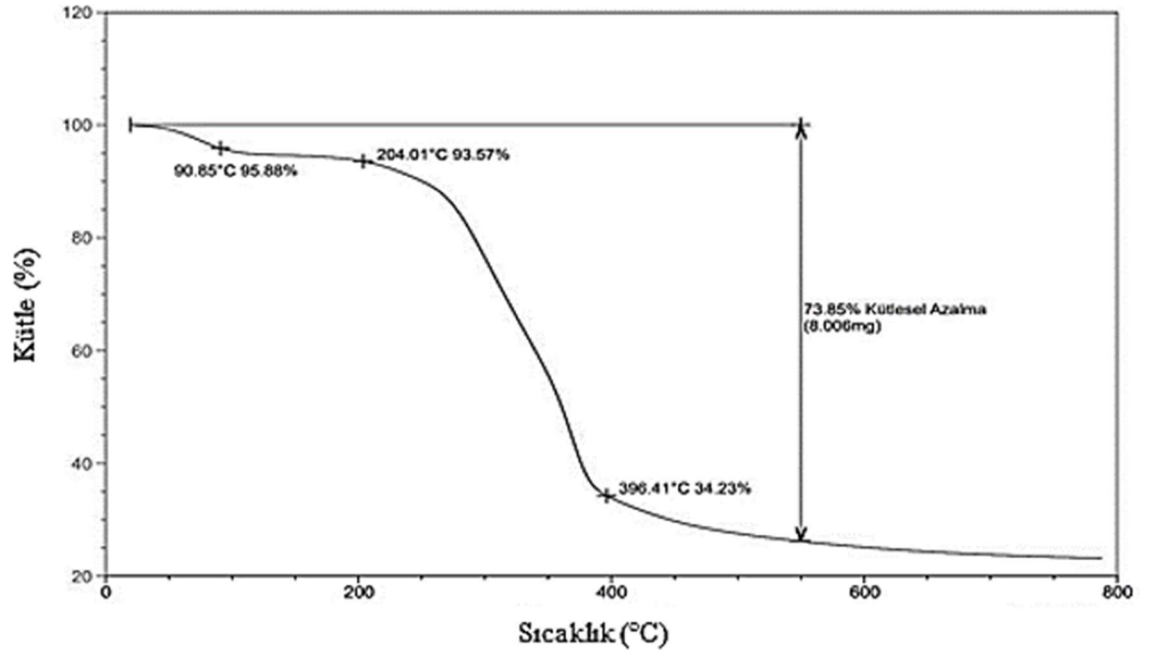
$$\eta = (P_e \times 3600) / (\dot{m}_y H_a) \quad (4.8)$$

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Termogravimetrik Analiz(TGA)

Reaksiyonda kullanılacak kayısı çekirdeği kabuğu tozlarının termal dekompozisyon karakteristikleri, 20 °C/dk ısıtma hızında, 100 ml/dk debideki azot atmosferinde yapılan termogravimetrik analiz ile belirlenmiştir.

Hammaddeye ait termogravimetrik analiz sonuçları Şekil 5.1’de verilmiştir. Grafikteki ilk azalma etkisi 36 °C’de başlayıp 108 °C’de biten kırılımda görülmektedir.



Şekil 5.1. Hammaddeye Ait TGA Sonuçları

Bu azalma biyokütle içerisinde bulunan nemin ortamdan uzaklaşması olarak yorumlanabilir. Grafikte görülen ikinci azalma 204 °C’de başlayıp 396 °C’de biten ve toplam kütlelerin yarısından daha fazlasının dekompoze olduğu kırılımda gözlemlenmektedir. Bu kırılım, biyokütle bünyesinde bulunan sırasıyla hemiselüloz, selüloz ve lignin yapıların bozunması ile meydana gelmiştir. Sonrasında görülen düşüş ise yüksek sıcaklıklarda ve görece olarak yavaş bozulan lignin yapının bozunması münasebetiyle gerçekleşmiştir.

### 5.2. Biyoyağ Üretimi

Deney tertibatı Bölüm 4.4’te detaylı anlatıldığı şekilde hazırlandıktan sonra piroliz prosesi başlatılmıştır. Reaktörden ilk reaksiyon gazı çıkışı, reaktör merkez sıcaklığı 170 °C’yi gösterdiğinde gerçekleşmiştir. Bu değer termogravimetrik analiz

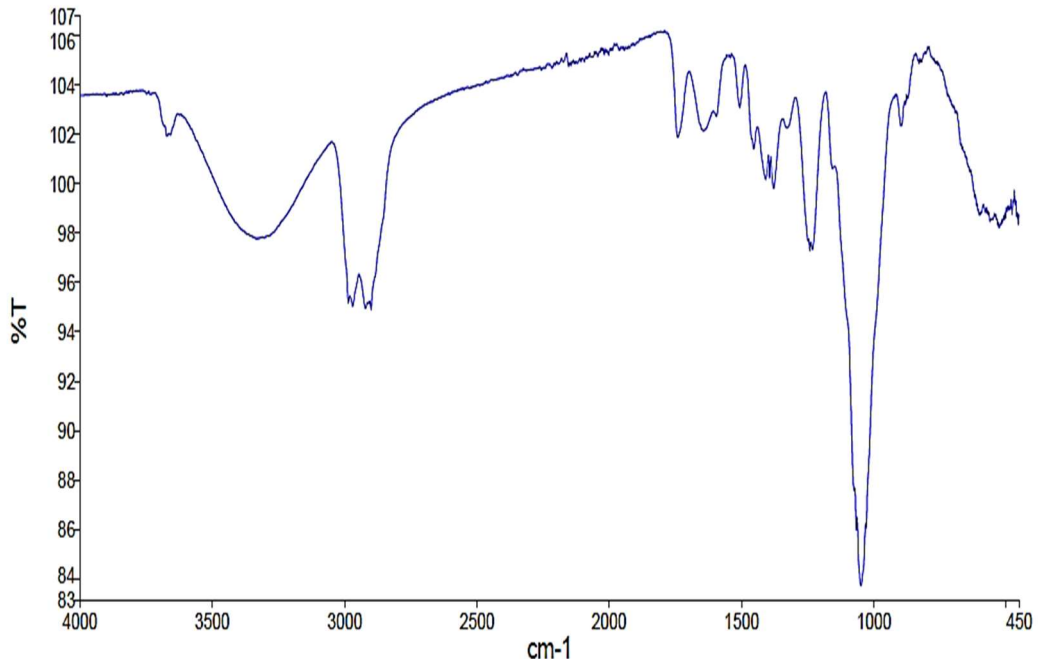
sonuçlarında gözlemlenen bozunma sıcaklığından farklı olmasının sebebi, reaktör merkez sıcaklığı ile çeperler arasındaki sıcaklık farkıdır. İlk çıkan reaksiyon gazları; parlak beyaz renkli ve bulutsu bir görünüme sahipken, reaksiyon ilerledikçe açığa çıkan reaksiyon gazlarının mat beyaz renkli olup dumansı bir görünüme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu görünüm farklılığının nedeni, İlk çıkan reaksiyon gazlarının daha hafif fazlı yapılar ihtiva edip, ilerleyen reaksiyon sürecindeki reaksiyon gazlarının daha ağır fazlı yapılar bulundurmasıdır. Nitekim reaksiyon gazlarında görülen bu görünüm farklılığının etkisi elde edilen biyoyağda da görülmüştür. Reaktörden gaz çıkışı, merkez sıcaklığı 410 °C'ye ulaştığında neredeyse bitme noktasına gelmiştir. Elde edilen biyoyağ 2 farklı faz yapısı göstermiştir. Görece daha hafif, daha akışkan ve açık geçirgen kahverengi renge sahip olan hafif faz üstte kalırken, daha ağır, daha viskoz ve opak koyu siyah renkli olan ağır faz dibine çökmüştür.

Her proses için reaktöre 75 gr öğütülmüş kurutulmuş kayısı çekirdeği kabuğu tozu yerleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda elde edilen biyoyağ 35 ml hacminde olup ağırlığı 30 gr olarak ölçülmüştür. Reaktörde kalan biyoçar ağırlığı ise 23,62 gr olarak kaydedilmiştir. Gaz ürün kütlesi ise, biyoyağ ve biyoçar kütlelerinin hammadde külesinden çıkartılması ile hesaplanmış olup 21,38 gr'dır. Yüzdesel olarak bakıldığında reaksiyonun kütle bazlı sıvı ürün verimi %40, biyoçar verimi %31,5 ve gaz ürün verimi %28,5 olmuştur. Elde edilen biyoyağın oransal olarak 5'te 1'i ağır faz yapısına sahip iken, 5'te 4'ü hafif faz yapısına sahiptir. Biyoyağın içerdiği kimyasal yapıların tayini, FTIR spektroskopisi ile belirlenen bağ yapıları ve literatürdeki benzer çalışmalardan faydalanarak yapılmıştır.

### **5.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi(FTIR)**

Hammadde olarak kullanılan kayısı çekirdeği kabuklarının ve piroliz sonucunda elde edilen 2 fazlı biyoyağın ağır ve hafif fazlarının her birinin muhteviyatındaki fonksiyonel grupların belirlenmesi ve yorumlanması için FTIR spektroskopisi kullanılmıştır. Her analiz ürünü 4000  $cm^{-1}$  ile 400  $cm^{-1}$  arası spektrumda incelenmiştir.

Ham biyokütleye ait FTIR sonuçları Şekil 5.2’de verilmiştir.  $3331\text{ cm}^{-1}$  ‘deki geniş pik, primer O-H bağı varlığı hakkında bilgi vermektedir. C-H tekil bağ bölgesindeki  $2901\text{ cm}^{-1}$ ’de oluşan gerilme titreşimi ise alifatik zincirlerin ve alkil gruplarının varlığına yorumlanabilir. C=O çift bağ bölgesinde görülen  $1740\text{-}1644\text{ cm}^{-1}$ ’deki gerilme titreşimleri aldehit, keton ve asit yapıların varlığı şeklinde değerlendirilebilir. Aynı şekilde  $1378\text{ cm}^{-1}$ ’de oluşan pik, alkil gruplarının ve alifatik zincirlerin varlığına yorumlanabilir(Yıldız & Ceylan, 2018).

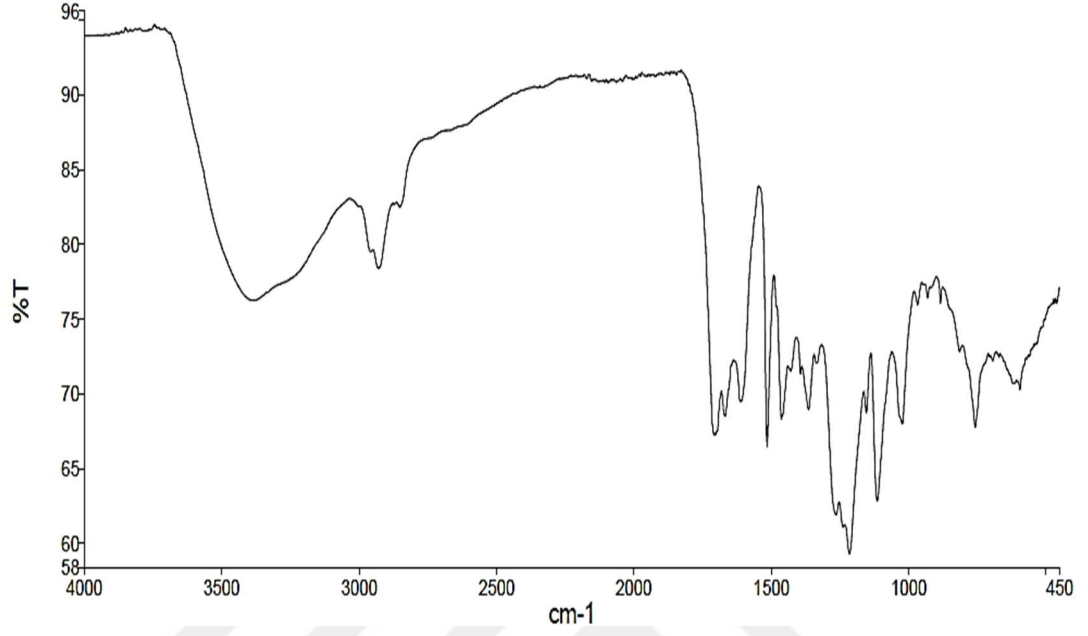


Şekil 5.2. Öğütülmüş Kayısı Çekirdeği Kabuklarına Ait FTIR Spektrum Grafiği

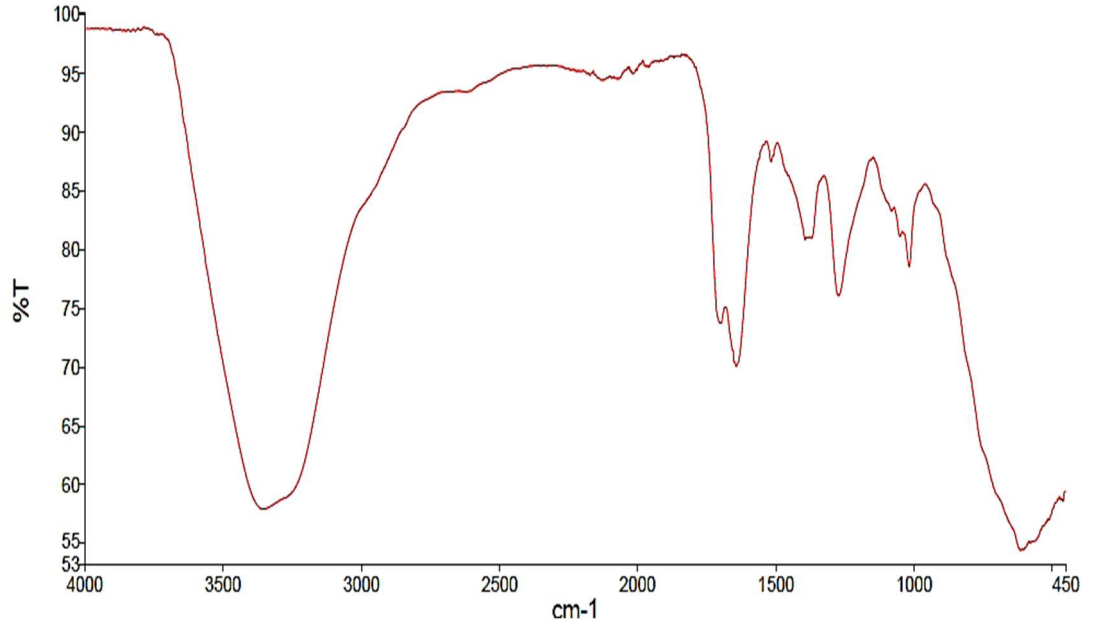
Piroliz işlemi sonucunda elde edilen biyoyağ 2 fazlı bir yapı göstermiştir. Ağır, viskoz ve daha koyu renkli olan faz tümüyle dibe çökerken, hafif, görece daha az viskoz ve daha açık renkli olan faz karışımın üstünde kalmıştır. Her iki sıvı faz için de FTIR analizi yapılmış olup analiz sonuçları Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te verilmiştir.

Her iki analiz sonucunda da  $3355$  ve  $3388\text{ cm}^{-1}$ ’de görülen pikler, ham biyokütleye de gözlemlenmiş olan O-H bağlarının sıvı üründe de var olduğunun bilgisini vermektedir. Ağır fazda daha belirgin olarak görülmesine karşın hafif fazda sadece gerilim olarak görülen  $2930\text{ cm}^{-1}$ ’deki titreşim, biyoyağın içeriğinde de alifatik zincirlerin ve alkil gruplarının varlığı hakkında bilgi vermektedir. Yine aynı şekilde ağır fazda daha şiddetli ve çift pik yapısı gösterip hafif fazda tek pik olarak görülen  $1707\text{-}1609\text{ cm}^{-1}$  aralığında görülen gerilme titreşimleri sıvı ürün içeriğinde aldehit, keton ve asidik yapıların varlığı şeklinde yorumlanabilir. Hafif fazda  $1393$

$cm^{-1}$ , de ve ağır fazda  $1462-1363 cm^{-1}$  aralığında görülen pikler, her iki fazda da alifatik zincir yapıların ve alkil gruplarının varlığı konusunda fikir vermektedir(Uzun & Yıldız, 2019; Nandiyanto, vd., 2019).



Şekil 5.3. Elde Edilen Biyoyağın Ağır Fazının FTIR Spektrum Grafiği



Şekil 5.4. Elde Edilen Biyoyağın Hafif Fazının FTIR Spektrum Grafiği

#### 5.4. Yakıt Karışımlarının Hazırlanması

Reaksiyondan elde edilen biyoyağ, kullanılan sistemden kaynaklı biyokütle tortuları içermesi, viskoz yapısı, yüzey gerilimi farklılıkları gibi pek çok sebepten dolayı, motorin ile doğrudan karışım özelliği göstermemiştir. Bu sebeple karışım için çeşitli çözücüler ve yüzey aktif maddeler kullanma gerekliliği doğmuştur. Karışım deneylerine başlanmadan önce biyoyağ, 100 mikron tel açıklığına sahip elekten geçirilerek içerisindeki istenmeyen biyokütle tortularından arındırılmıştır. Süzülmuş olan biyoyağa ilk etapta farklı çözücüler karşısındaki davranışlarını gözlemlemek için metanol, etanol, bütanol, aseton ve triasetin ile karıştırılarak çözünme miktarları incelenmiştir. Denenen tüm çözücüler, biyoyağı istenilen oranda çözmüş olup, en iyi çözünme davranışı etanol ve asetonda görülmüştür. Biyoyağın, denenen çözücüler içerisinde çözünme miktarı sırasıyla aseton>etanol>metanol>bütanol>triasetin şeklinde olmuştur. Sonrasında bu çözeltiler, herhangi bir yüzey aktif madde olmaksızın motorin ile karıştırılmış, gösterdiği karışım davranışları incelenmiştir. Etanol ve metanol içeren biyoyağ çözeltileri (EB, MB), motorin ile karıştırıldığında (EBM, MBM), biyoyağ tamamen polimerleşerek beherin dibine yapışmış, herhangi bir karışım özelliği göstermemiştir. Triasetin-biyoyağ (TAB) çözeltisi, motorin ile karıştırıldığında (TABM), motorinde bir miktar renk değişikliği görülmüş fakat biyoyağ tamamen dibe çökerek karışım özelliği göstermemiştir. Aseton-biyoyağ çözeltisi (AB) motorin ile karıştırıldığında (ABM), biyoyağ damlacıkları oldukça küçük boyutlara parçalanabilmiş ve karışım içerisinde homojen dağılabilmiş fakat karışım stabilitesinde bir değişiklik görülmemiştir. Bütanol-biyoyağ (BB) çözeltisi motorin ile karıştırıldığında (BBM), AB çözeltisinin davranışına benzer bir karışım özelliği göstermiştir fakat farklı olarak BBM'de ABM'ye göre daha büyük damlacık boyutları görülürken, daha iyi karışım stabilitesi elde edilmiştir. AB ve BB çözeltilerinin gösterdiği davranışlar hasebiyle aseton-bütanol-biyoyağ çözeltisi (ABB) hazırlanıp motorine karıştırılarak (ABBM) her iki çözeltinin de olumlu yanları olan küçük damlacık boyutu ve görece yüksek stabilite elde edilmesi hedeflenmiş ve başarılı olunmuştur.

Biyoyağın çözücüler karşısındaki davranışları kaydedildikten sonra TABM, ABM, BBM ve ABBM karışımları için çeşitli yüzey aktif maddeler denenerek karışım stabilitesi artırılmaya çalışılmıştır. Yüzey aktif madde deneylerinde oleik asit, Tween 80, Span 80, Darvan C-N denenmiş, karışım özelliklerine etkileri incelenmiştir. Oleik

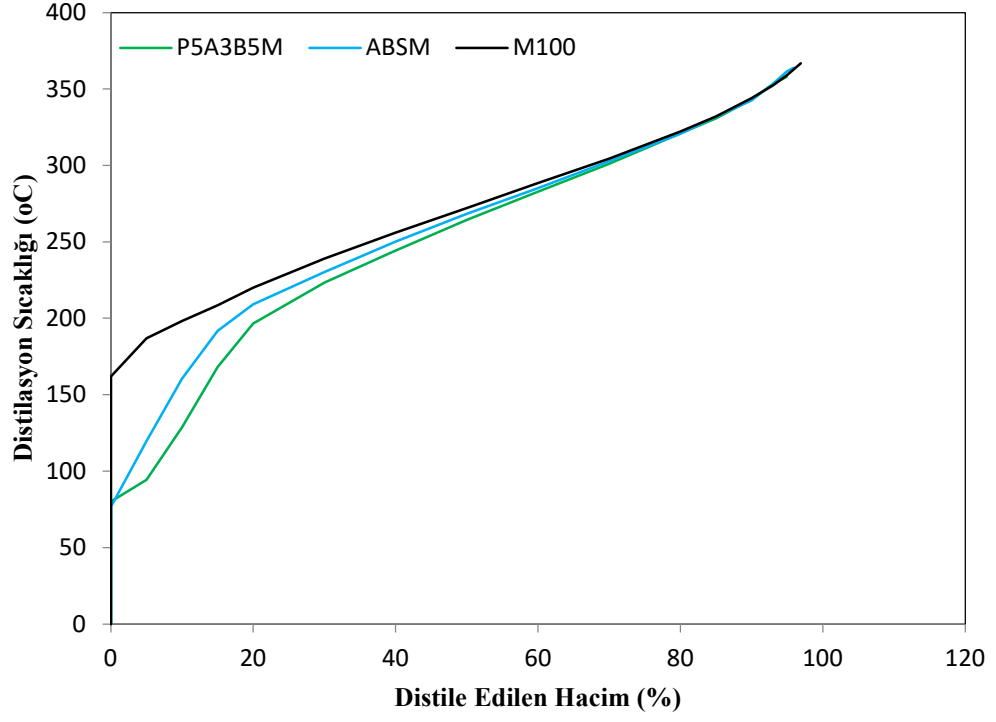
asit, karışımların hiçbirinde olumlu yada olumsuz etki göstermez iken, Tween 80 ve Darvan C-N tüm karışımların stabilitelerinin dramatik şekilde azalmasına sebep olmuştur. Karıştırma işlemi sırasında Tween 80 ve Darvan C-N karışımlara eklendiği anda karışımların içindeki tüm biyoyağ karışımlardan ayrışarak dibe çökmüş ve bir daha karışmamıştır. Span 80 ise TABM hariç tüm diğer karışımlarda stabilizeyi ve damlacıkların homojen dağılma miktarlarını artırıcı yönde etki göstermiştir. Span 80 kullanılan karışımlardan ABBM, en stabil ve homojen karışım olduğundan motor deneylerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Karışım deneyleri manyetik karıştırıcıda yapılmış olup her karışım maddesi için ayrı ayrı farklı oranlar denenmiştir. Karışım deneylerinde biyoyağın hafif ve ağır fazları ayrı ayrı denenmiş, stabilize ve homojenlik bakımından iki faz karışımı arasında sonuçları etkileyecek bir fark görülmemiştir. Yapılan farklı oran deneyleri sonucunda motor testlerinde kullanılacak yakıt içindeki karışım oranları %5 biyoyağ, %3 aseton, %5 bütanol %87 motorin olarak belirlenmiş, P5A3B5M şeklinde kodlanmıştır. İlk aşamada sırasıyla biyoyağ, aseton, bütanol ve birkaç damla Span 80 beher içerisine alınarak manyetik karıştırıcıda 1000 d/dak karıştırma hızında 5 dakika karıştırılmıştır. Sonrasında beherin içerisine motorin eklenerek 10 dakika daha karıştırılmış ve karışım içerisindeki tüm katkıların damlacıklar halinde askıda kalması sağlanmıştır. Homojen karışım sağlandıktan sonra tüm karışım damlacık boyutlarının küçültülmesi ve tamamen dağıtılması amacıyla ultrasonik homojenizatör haznesine aktarılmış ve 2 saat boyunca ultrasonik karıştırılarak motor testlerine hazır hale getirilmiştir. Pirolitik biyoyağın, dizel yakıt katkısı olarak kullanımının etkisinin daha net görülebilmesi için çözücü ve yüzey aktif madde etkisinin de görülebilmesi amacıyla motor testlerinde P5A3B5M'ye ek olarak, P5A3B5M karışımının biyoyağ katılmamış hali olan ve aynı oranlarda aseton bütanol ve Span 80 içeren ABSM kodlu karışım ve saf motorin (M100) kullanılmıştır. ABSM karışımı aseton bütanol Span 80 ve motorin aynı anda behere koyularak manyetik karıştırıcı ile hazırlanmıştır. Tüm test yakıtlarının; görünümleri, yakıt özellikleri ve distilasyon eğrileri sırasıyla Şekil 5.5, Tablo 5.1 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. Deneylerde Kullanılan Yakıtlar

Tablo 5.1. Deneylerde Kullanılan Yakıtların Özellikleri

Özellikler	Birim	M100	ABSM	P5A3B5M
Yoğunluk	kg/m <sup>3</sup>	828,8	827,2	838,1
Su içeriği	% m/m	30	318	636
Kükürt içeriği	mg/kg	4,8	4,4	56
Parlama Noktası	°C	61	>24	>24
Soğuk Filtre Tıkama Noktası	°C	-22	-18	-16
Setan İndisi	-	55	52,8	47,2
Alt Isıl Değer	kJ/kg	42797	41781	41136
İlk Kaynama Sıcaklığı (Distilasyon)	°C	162	76,8	80,1
Son Kaynama Sıcaklığı (Distilasyon)	°C	367	364,1	358,1

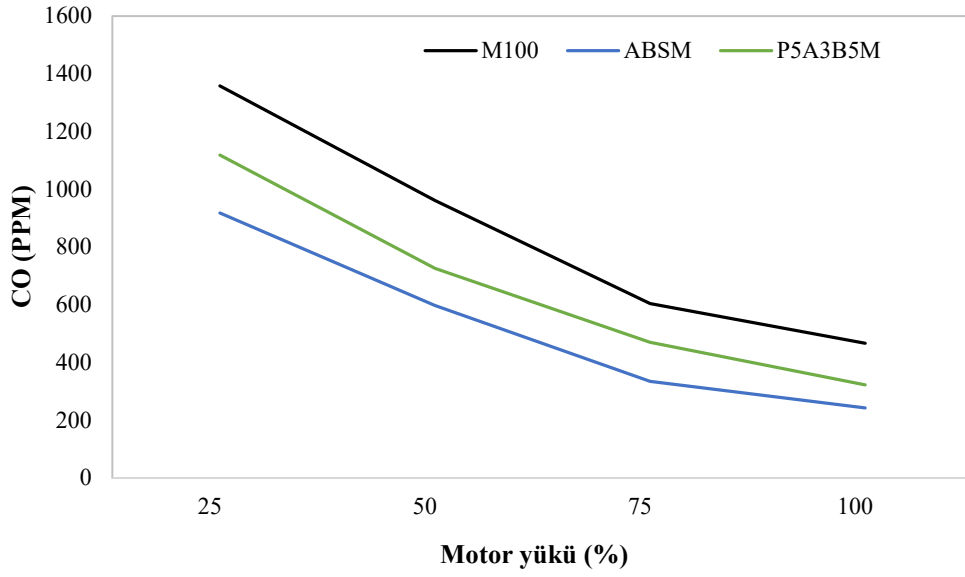


Şekil 5.6. Deneylerde Kullanılan Yakıtların Distilasyon Eğrileri

## 5.5. Pirolitik Biyoyağ Katkılı Motorinin Motor Performans ve Emisyon ve Yanma Karakteristiklerine Etkisi

Motor deneylerinde Bölüm 5.4'te üretiminden bahsedilen M100, ABSM ve P5A3B5M yakıtları kullanılmıştır. ABSM yakıtının kullanılmasının amacı, pirolitik biyoyağın motorine karıştırılabilmesi için kullanılan çözücü ve yüzey aktif maddelerin, esas deney yakıtı olan P5A3B6M yakıtının deney sonuçlarındaki payını görmek ve P5A3B5M yakıtı deney sonuçlarının saf motorin deney sonuçları ile kıyaslanırken daha verimli bir kıyaslama yapılabilmesidir. Yapılan motor deneyleri, 1500 d/dk sabit devirde, 17,5:1 sıkıştırma oranında ve ÜÖN'dan 23 °KMA önce püskürtme sağlayacak şekilde püskürtme avansında yapılmıştır.

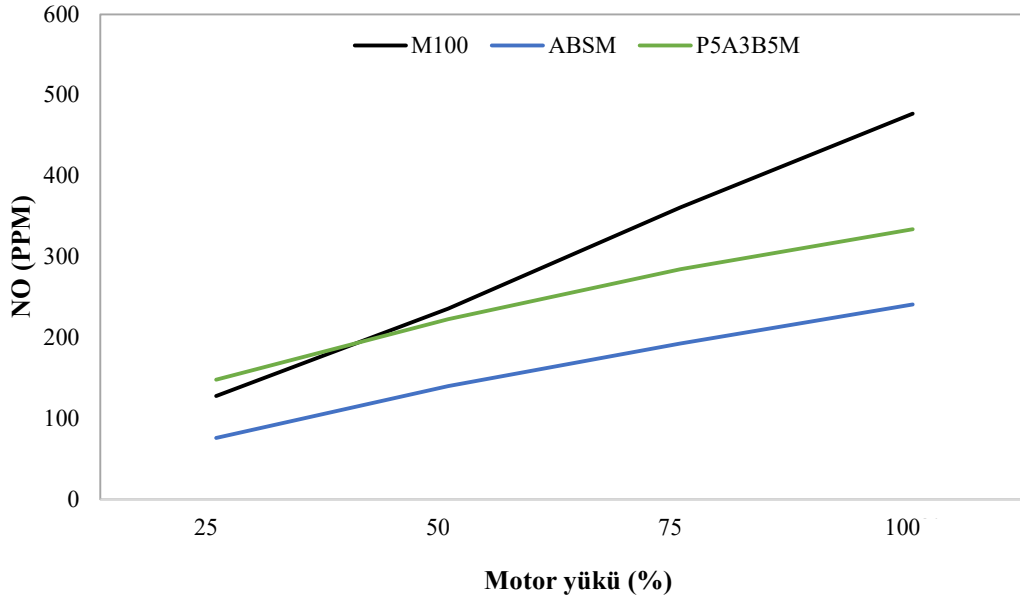
Dizel motorlarda CO emisyonu; yakıt içeriğindeki karbon ve emme havasındaki oksijenin eksik yanması sonucu oluşmakla birlikte yüksek oranda H/Y oranı ve yanma odası sıcaklığına bağlıdır. Eksik yanma ürünü olduğundan kullanılamamış kimyasal enerji olarak görülür. Bunların yanında CO emisyonu son derece toksik bir gazdır. Kanda bulunan hemoglobin ile birleşerek karboksihemoglobin oluşturur ve bu da insan bünyesinde boğucu etki yaratır. Şekil 5.7'de CO emisyonunun deneyde kullanılan yakıtlar için motor yüküne bağlı olarak değişim eğrileri verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere en yüksek CO emisyonu motorun %25 yüklendiği durumda oluşurken motor yükü arttıkça 3 yakıt için de CO emisyon değerleri azalmış ve tam yükte CO emisyon değerleri en düşük seviyesine ulaşmıştır. Tüm motor yüklerinde ABSM ve P5A3B5M yakıtlarının CO emisyon değerleri, M100'e göre daha az olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi bütanol ve aseton içeriğindeki yüksek oksijen miktarıdır. Yanma odasındaki artan oksijen konsantrasyonu eksik yanma oranını azaltmış ve bu da CO emisyonunun düşük seviyelerde kalmasını sağlamıştır. Bu bakımdan CO emisyon değerleri en düşük olan yakıt ABSM olmuştur. P5A3B5M yakıtının CO emisyon ölçüm sonuçlarının ABSM'den yüksek çıkmasının nedeni ise ek olarak katılan pirolitik biyoyağın ısıl değerinin düşük olması nedeniyle karışımın ısıl değerini düşürmesi ve düşük sıcaklıklarda CO emisyonlarının artma eğilimi göstermesi olarak açıklanabilir. Tüm motor yüklerinde yapılan ölçümlerdeki CO emisyon değerlerinin ortalaması alındığında ABSM ve P5A3B5M yakıtları, CO emisyonlarını M100 yakıtına kıyasla sırasıyla %38,25 ve %22,19 oranında azaltmıştır.



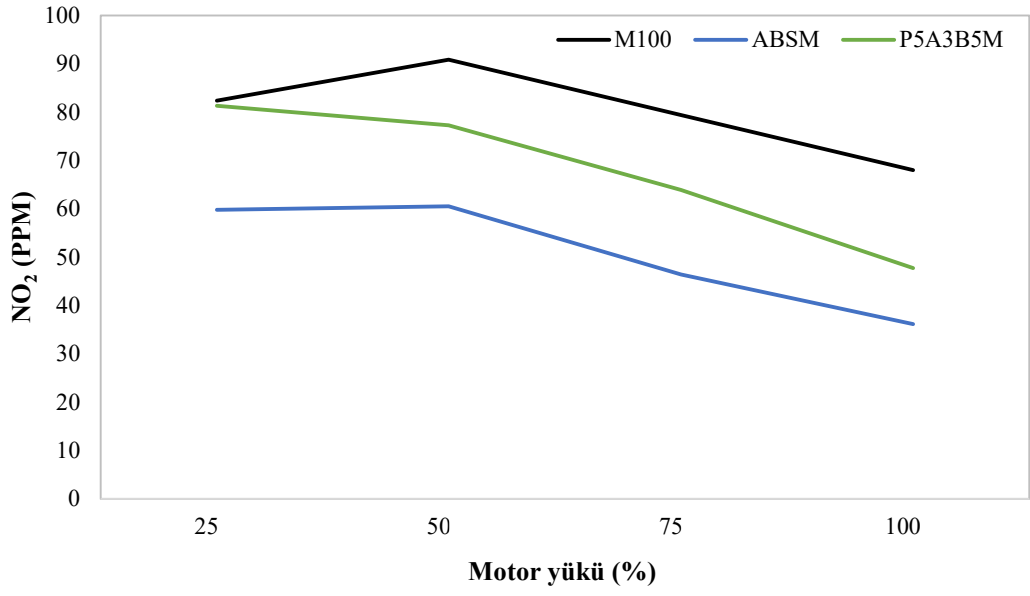
Şekil 5.7. Test Yakıtlarının CO Emisyon Ölçüm Sonuçları

Azot oksit emisyonları, dizel motorlardaki en çok önem teşkil eden emisyondur. Emme havası içerisinde bulunan ve yanmaya doğrudan dahil olmayan azot, yüksek silindir içi sıcaklık ve basınçlarında ortamdaki oksijen ile çeşitli kombinasyonlarda birleşerek azot oksitleri meydana getirir. Bu azot oksitler; NO, NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> olmakla birlikte genelleştirilerek NO<sub>x</sub> olarak telaffuz edilir. Azot oksitler atmosferde bulunan su buharı ile reaksiyona girerek asit yağmurlarını meydana getirmekte ve bu da aynı anda kara, deniz ve hava kirliliğine yol açabilmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonları, azaltılması için yapılan uygulamaların pek çoğunun diğer emisyon değerlerinde ve yakıt sarfiyatında artışa sebebiyet vermesi münasebetiyle kontrolü zor olan bir emisyondur. Şekil 5.8, Şekil 5.10 ve Şekil 5.9'da NO, NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının, deneyde kullanılan yakıtlar için motor yüküne bağlı olarak değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, motor yükü arttıkça tüm yakıtlar için NO emisyonları artmış, NO<sub>2</sub> emisyonları azalmış ve bunlara paralel olarak da NO<sub>x</sub> emisyonları artış göstermiştir. Toplam azot oksit emisyonlarının artmasının sebebi, artan motor yükünden kaynaklanan silindir içi sıcaklık ve basınç artışlarıdır. NO emisyonunun oluşum mekanizması, NO<sub>2</sub> emisyonunun oluşum mekanizmasına nazaran daha kolay olduğundan hava ile alınan sabit azot miktarı münasebetiyle NO emisyonları grafiğinde artış gözlenirken NO<sub>2</sub> grafiğinde azalma gözlemlenmiştir. Tüm azot oksit emisyon grafiklerinde görüleceği üzere en düşük azot oksit emisyonları ABSM yakıtının kullanıldığı deneylerde, en yüksek azot oksit emisyonları ise M100 yakıtının

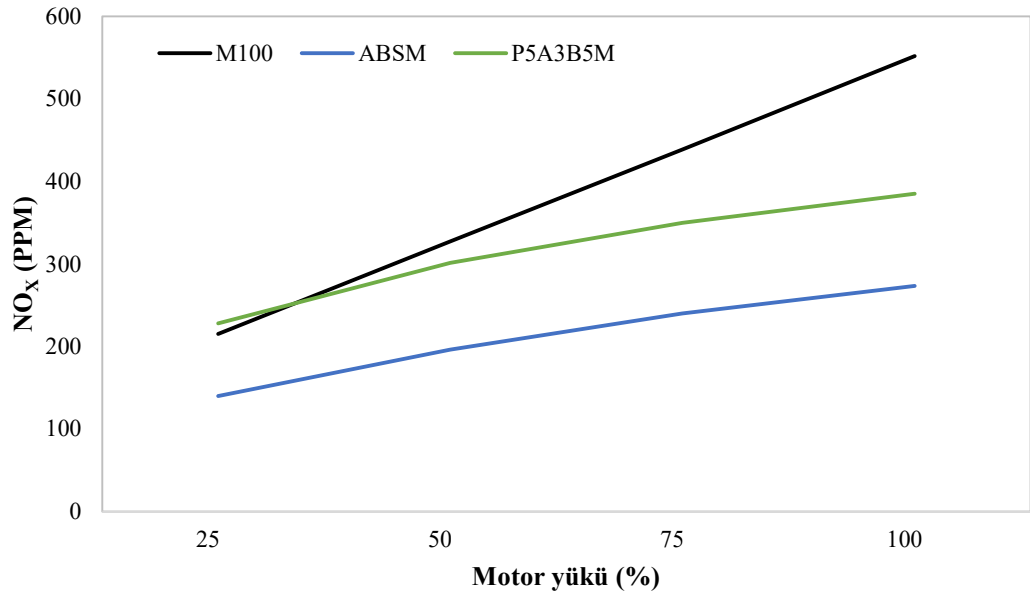
kullanıldığı deneylerde ölçülmüştür. ABSM ve P5A3B5M yakıtlarında düşük azot oksit emisyonları elde edilmesinin nedeni, bütanol ve asetonun düşük buharlaşma sıcaklıkları ve yüksek oksijen içerikleri münasebetiyle yanma sıcaklığını düşürerek azot oksit oluşum mekanizmalarını engelleyici rol oynamasıdır. Grafiklerde en dikkat çeken nokta, P5A3B5M yakıtının azot oksit emisyon değerlerinin tüm motor yüklerinde M100 yakıtının kullanıldığı deneylere nazaran düşük çıkmasına karşın %25 motor yükünde M100 yakıtından daha fazla azot oksit emisyonları oluşturmuş olmasıdır. Bütün motor deneylerindeki NO , NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyon ölçümlerinin kendi aralarında ortalaması alınıp karşılaştırıldığında ABSM ve P5A3B5M yakıtlarının, saf motorin kullanılan duruma göre; NO emisyonlarını sırasıyla %45,93 ve %17,66 oranlarında, NO<sub>2</sub> emisyonlarını sırasıyla %36,72 ve %15,72 oranlarında, NO<sub>x</sub> emisyonlarını ise sırasıyla %44,57 ve %17,51 oranlarında azalttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. Test yakıtlarının NO Emisyon Ölçüm Sonuçları

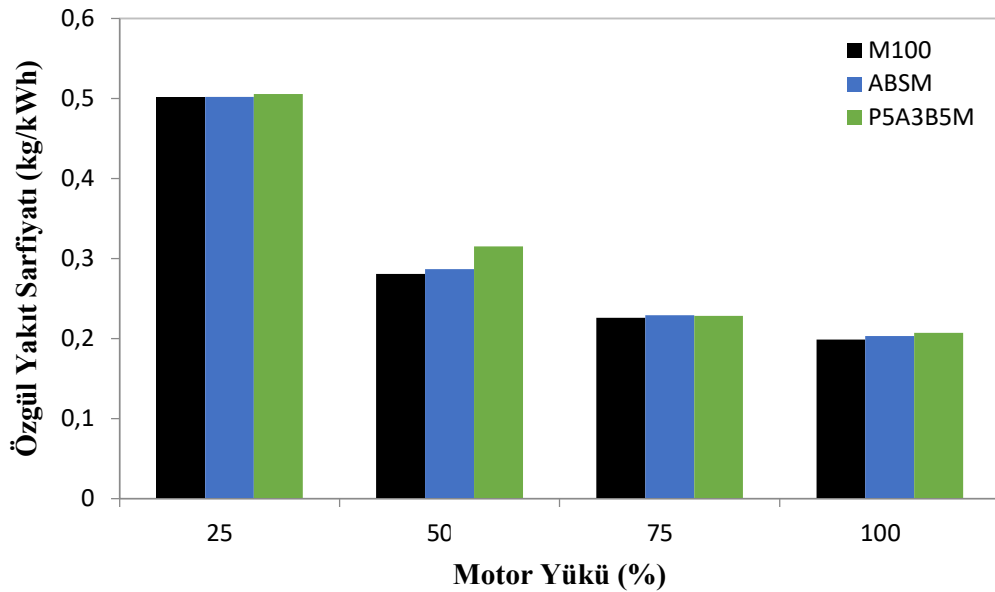


Şekil 5.9. Test Yakıtlarının NO<sub>2</sub> Emisyon Ölçüm Sonuçları



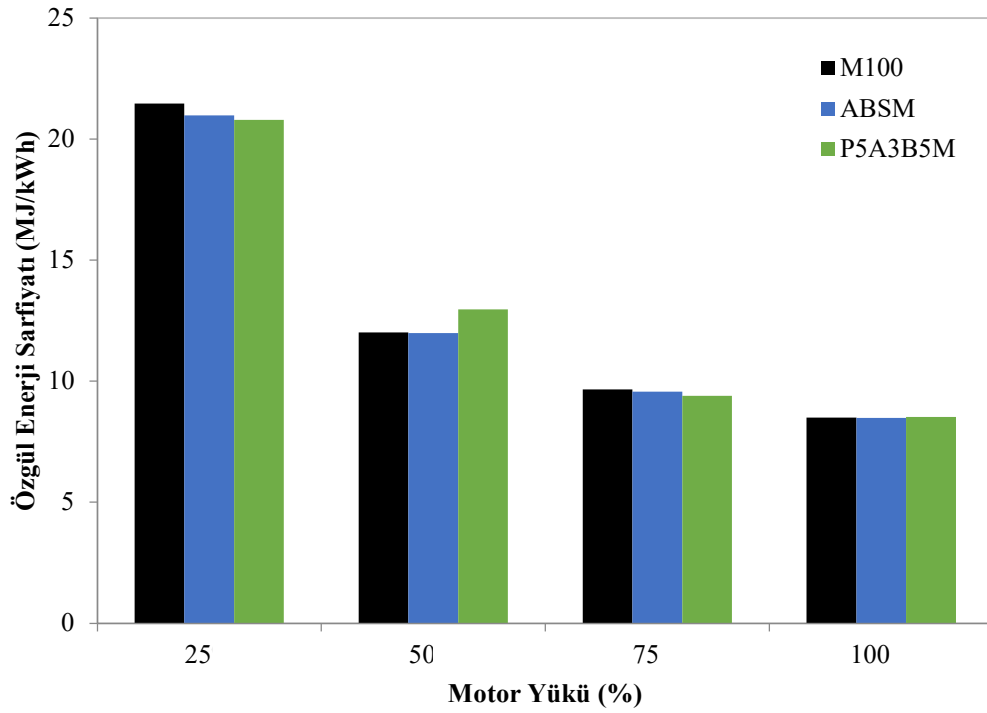
Şekil 5.10. Test yakıtlarının NO<sub>x</sub> Emisyon Ölçüm Sonuçları

Deney yakıtlarının, motorun özgül yakıt sarfiyatına etkisi Şekil 5.11’de verilmiştir. Özgül yakıt sarfiyatındaki değişim incelendiğinde, artan motor yüklerinde efektif gücün de artması sonucu, özgül yakıt sarfiyatı azalmış ve tüm yakıtların deney sonuçlarında en düşük özgül yakıt sarfiyatı tam yük koşullarında elde edilmiştir. Bu durum, artan motor yüklerinde yanma sıcaklıklarının da artması, bunun sağladığı termal verim artışı ve buna bağlı olarak birim güç başına ihtiyaç duyulan yakıt miktarının azalmasından kaynaklanır. Ayrıca grafikte artan motor yüklerinde yakıtlar arasındaki özgül yakıt sarfiyatı farklılıklarının azaldığı da gözlenmektedir. Yüksek motor yüklerinde yanma odası ortam sıcaklığının yüksek olması, enjektörden püskürtülen yakıtın emme havasıyla daha homojen karışmasını sağlamış ve bu sebeple tüm yakıtların özgül yakıt tüketimi değerleri birbirine yaklaşmıştır. ABSM ve P5A3B5M yakıtları, içerdikleri tüm katkılardan dolayı sahip oldukları görece düşük ısıl değerleri münasebetiyle M100 yakıtına göre tüm motor yüklerinde daha yüksek özgül yakıt tüketimine sahiptir. P5A3B5M yakıtının özellikle %50 motor yükünde daha belirgin olarak görüldüğü üzere yakıt tüketiminin daha fazla çıkmasının sebebi diğer tüm katkılardan daha düşük ısıl değere ve daha yüksek yoğunluğa sahip olan pirolitik biyoyağ katkısı içermesidir. Bütün motor yüklerindeki özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin ortalamaları alınıp kendi aralarında kıyaslandığında, ABSM ve P5A3B5M’nin özgül yakıt sarfiyatı değerlerinin, M100 yakıtına göre sırasıyla %1,18 ve %4,09 oranlarında artış gösterdiği tespit edilmiştir.



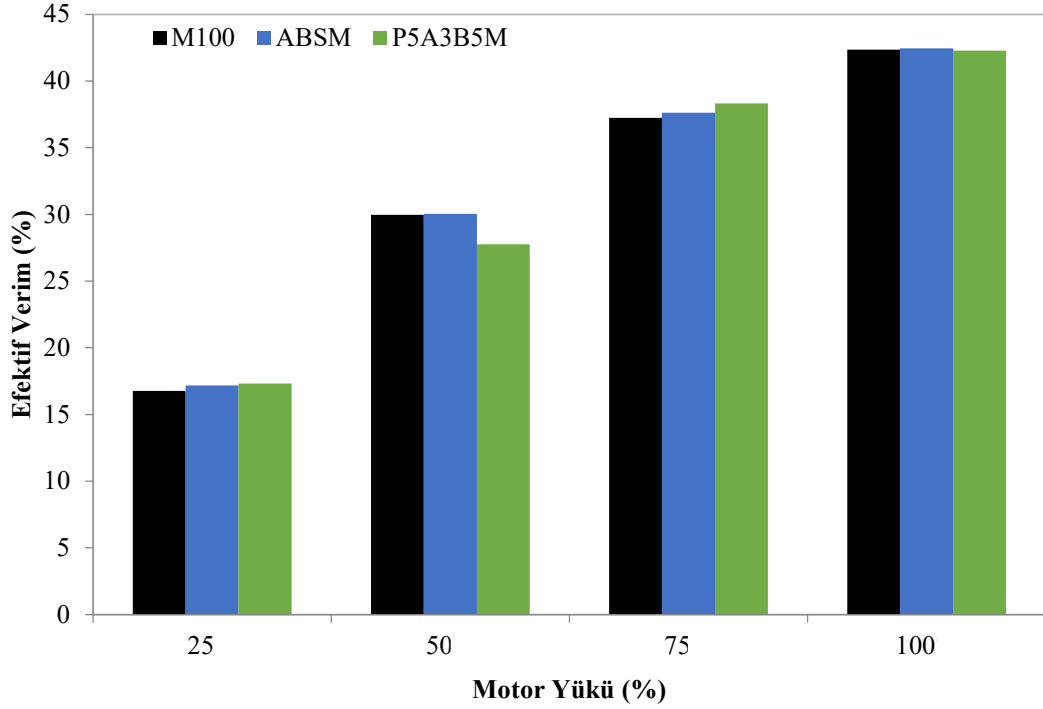
Şekil 5.11. Test Yakıtlarının Özgül Yakıt Sarfiyatı Değerleri

Özgül yakıt sarfıyatı, birim zamanda bir birim güç üretmek için motorun ihtiyaç duyduğu yakıt kütleini ifade eder. Fakat deney yakıtlarının sahip oldukları farklı ısı değerler münasebetiyle performans kıyaslamalarında özgül enerji sarfıyatının da göz önünde bulundurulması gerekir. Özgül enerji sarfıyatı, özgül yakıt sarfıyatından farklı olarak birim zamanda bir birim güç üretmek için motorun ihtiyaç duyduğu yakıt enerjisi miktarı olarak tanımlanır. Deneylerde kullanılan yakıtların, motorun özgül enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri Şekil 5.12'deki grafikte verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, özgül enerji sarfıyatının artan motor yüklerine göre değişim karakteristiğinin, özgül yakıt sarfıyatındaki değişime benzer özellikte olduğu görülmektedir. Fakat aynı yük koşullarındaki karakteristikler ters yönde özellikler göstermiştir. Örneğin %25 motor yükünde özgül yakıt sarfıyatı sıralaması P5A3B5M>ABSM>M100 iken özgül enerji sarfıyatı sıralaması M100>ABSM>P5A3B5M şeklinde gerçekleşmiştir. Bunun sebebi yakıtlarının yoğunluklarının ve ısı değerlerinin değişim oranları arasındaki farklılıktır. Mekanik enjeksiyon sistemine sahip test motorunda yakıt hacimsel olarak püskürtüldüğü için, yoğunluğu görece olarak daha yüksek olan yakıtların kullanıldığı durumlarda yanma odasına giren yakıt enerjisi daha fazla olur. Fakat yakıtın ısı değeri yoğunluğa göre daha baskın bir etken olduğu için özgül enerji sarfıyatı grafiği, özgül yakıt sarfıyatı grafiğine göre aynı yüklerde ters yönde özellik göstermiştir. Bütün motor yüklerindeki özgül enerji sarfıyatı değerlerinin ortalamaları alınıp kendi aralarında kıyaslandığında ABSM yakıtının M100 yakıtına göre özgül enerji sarfıyatında %1,21'lik bir azalmaya sebep olduğu, P5A3B5M yakıtının ise M100 yakıtına göre %0,05 gibi yok sayılabilecek bir oranda artışa sebep olduğu görülmüştür.



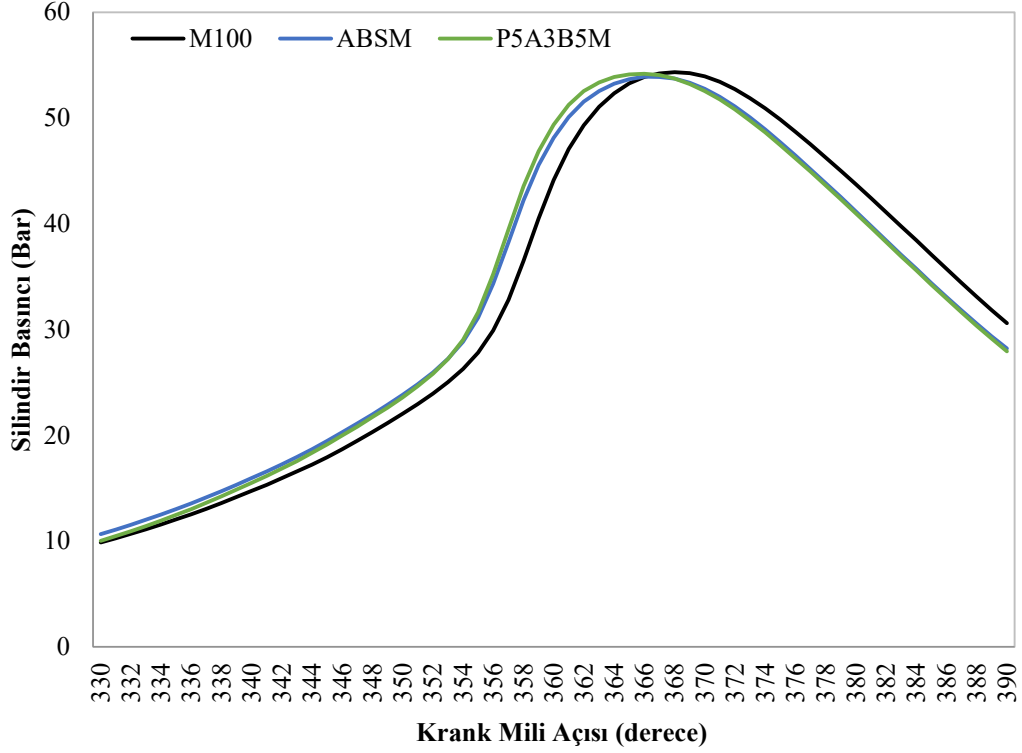
Şekil 5.12. Test Yakıtlarının Özgöl Enerji Sarfiyatı Değerleri

Deney yakıtlarının motorun efektif verimine etkileri Şekil 5.13'te verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere motor yükü artıkça tüm yakıtlar için efektif verim artmış ve tam yük koşullarında efektif verim en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bunun sebepleri; artan yüklerde eksik yanmanın azalması ve ısı kayıplarının oransal olarak azalmasıdır. Tam yük koşullarında deney yakıtlarının efektif verimleri; M100 yakıtı için %42,36, ABSM yakıtı için %42,46 ve P5A3B5M yakıtı için %42,27 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlarda görüldüğü üzere tam yükte çalışma koşullarında ABSM yakıtı efektif verimi artırırken P5A3B5M yakıtı efektif verimi azaltmıştır. Tam yük koşullarında yanma odası sıcaklığı daha yüksek olduğundan karışım yakıtların içerisindeki yüksek oksijen içeriğine sahip aseton ve bütanol daha kolay buharlaşarak yakıtın yanma verimini artırmış, bu sebeple yakıtların efektif verim değerleri yüksek çıkmıştır. Ancak P5A3B5M yakıtının efektif verimi, her ne kadar katkıların özelliklerinden dolayı biraz yükselse de içeriğindeki pirolitik biyoyağın ısı değerinin düşük olması münasebetiyle M100 yakıtından daha düşük olmuştur. Fakat bu fark göz ardı edilebilecek düzeyde küçüktür. Tam yük koşullarında ABSM yakıtının efektif verimi M100 yakıtına göre %0,24 artmış, P5A3B5M yakıtının efektif verimi ise M100 yakıtına göre %0,21 azalmıştır.



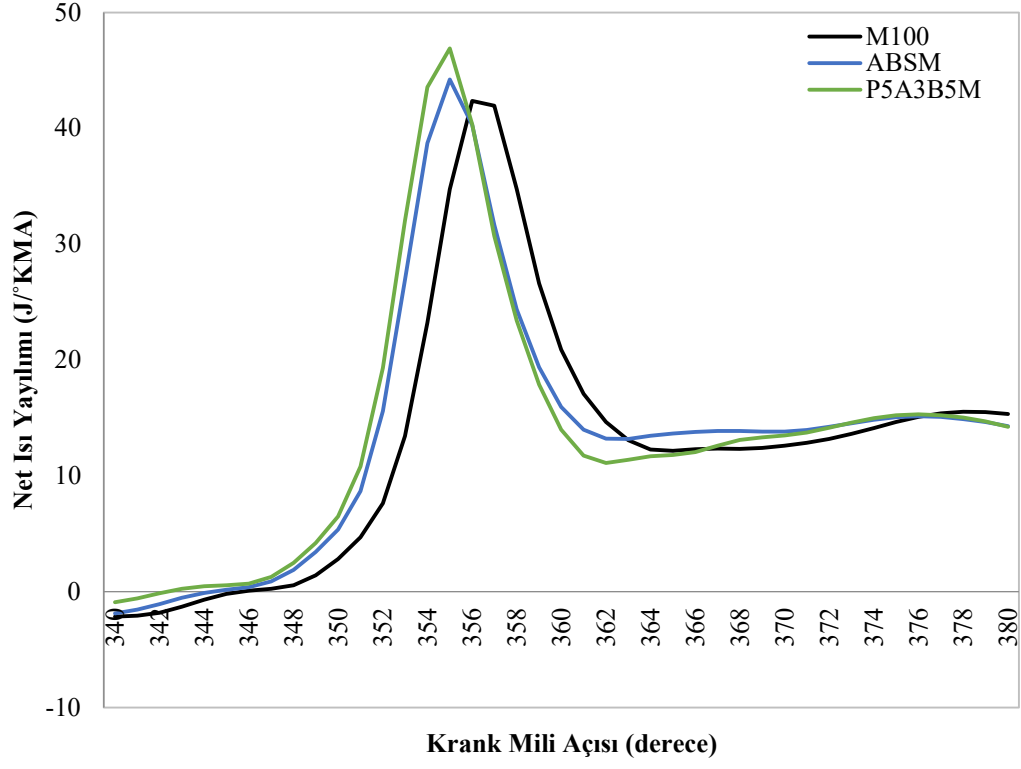
Şekil 5.13. Test Yakıtlarının Efektif Verim Değerleri

Krank milinin konumuna göre silindir basıncının değişimi tüm yakıtlar için motorun tam yük koşullarında ölçölmüş olup Şekil 5.14'teki grafikte verilmiştir. Grafikten de görölebileceği üzere tüm test yakıtlarının basınç değişim karakteristikleri birbirleri ile neredeyse aynı şekilde olup, ABSM ve P5A3B5M yakıtlarında, M100 yakıtına nazaran az miktarda basınç artışı gözlenirken maksimum basınç değerine ulaştıkları °KMA değerinde de düşük seviyede azalma gözlenmiştir. ABSM ve P5A3B5M yakıtlarında görölen erken basınç artışlarının ve çok düşük miktarda da olsa daha yüksek maksimum basınç değerlerinin nedeni, karışımların katkılarında dolayı sahip oldukları yüksek oksijen içeriği ve düşük buharlaşma ve parlama sıcaklığı değerleri münasebetiyle yakıtların daha efektif ve erken yanmaları olarak değerlendirilebilir. Şekil 5.15'teki net ısı yayılımı grafiğinde karışım yakıtların gösterdiği daha yüksek net ısı yayılımı değerleri de bu savı destekler niteliktedir. P5A3B5M, ABSM ve M100 yakıtlarının en yüksek basınca ulaştıkları °KMA değerleri ve en yüksek silindir içi basınç değerleri sırasıyla; 366 °KMA'da 54,19 bar, 367 °KMA'da 53,895 bar ve 368 °KMA'da 54,335 bar olarak ölçölmüştür.



Şekil 5.14. Test Yakıtları İçin Tam Yükte Silindir Basınç Değişim Eğrileri

Yakıtın ihtiva ettiği kimyasal enerjinin ısıya dönüşüm hızının ifadesi olan ve yanma hızıyla ilişkilendirilebilen net ısı yayılımının krank mili açısına göre değişimi gösteren grafik Şekil 5.15'te verilmiştir. Net ısı yayılımı/°KMA ölçümleri tüm yakıtlar için motorun tam yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. P5A3B5M ve ABSM yakıtları, düşük buharlaşma ısıları ve görece yüksek oksijen içerikleri münasebetiyle basınç değişim grafiğinde olduğu gibi net ısı yayılımında da en yüksek değerine M100 yakıtına göre daha erken ulaşmışlardır ve daha hızlı bir yanma göstererek daha yüksek net ısı yayılımı değerlerine erişmişlerdir. Maksimum net ısı yayılımı değerleri, P5A3B5M, ABSM ve M100 yakıtları için sırasıyla; 355 °KMA'da 46,89 J/°KMA, 355 °KMA'da 44,205 J/°KMA ve 356 °KMA'da 42,36 J/°KMA olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.15. Test Yakıtları İçin Tam Yükte Net Isı Yayılımı Eğrileri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma; selülozik biyokütle kaynaklarından biri olan ve yoğun selülozik yapısıyla öne çıkan çekirdek kabuklarından kayısı çekirdeği kabuğunun piroliz karakteristiğini görmek ve elde edilen biyoyağın pirolitik yakıt katkısı olarak değerlendirilmesinin biyoenerji potansiyelinin araştırılması ve dizel motor performansına etkileri araştırılmış, elde edilen temel sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çalışma kapsamında, Türkiye'nin Malatya ilindeki çiftçilerinden alınan atık kayısı çekirdeği kabukları, sabit yataklı bir piroliz reaktöründe ve literatürdeki çeşitli çalışmalardan esinlenerek belirlenen proses parametrelerinde piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Piroliz işlemi sonucunda biyokütle, kütleli olarak %40 oranında biyoyağa dönüşmüştür.
- Elde edilen biyoyağ çift fazlı bir yapı göstermekle birlikte biyoyağın her iki fazına da FTIR spektroskopisi ve literatürdeki benzer çalışmalardan faydalanarak içerik tayini yapılmaya çalışılmış, karışımda dibe çöken ağır fazda daha yoğun olmak üzere her iki fazda da biyoyağın yakıt olarak değerlendirilebilme potansiyelinin yüksekliğine yorulabilecek yoğun alifatik ve aromatik bileşenlere rastlanmıştır.
- Deneyle dizel yakıt katkısı olarak biyoyağın ağır fazı kullanılmıştır. Biyoyağ, viskoz yapısı, yoğunluğu ve yüzey gerilimi farklılıkları gibi nedenlerden dolayı ürün olarak alındığı haliyle motorin ile karışmamıştır. Bu sebeple biyoyağın motorin ile karışmasını sağlamak için; metanol, etanol, bütanol, aseton ve triasetin gibi çözücüler ile Tween 80, Span 80 ve Darvan C-N gibi yüzey aktif maddeler kullanılarak çeşitli karışım oranlarında stabilite testleri yapılmış, en iyi karışım özelliği %5 biyoyağ, %3 aseton, %5 bütanol ve Span 80 kullanılan karışımda elde edilmiştir.
- Kullanılan bu katkı maddeleri, dizel yakıtının performans değerlerine doğrudan etki edecek yapıda oldukları için, pirolitik biyoyağın bağımsız olarak etkilerini görmek amacıyla motor testleri için saf motorini temsil eden M100 yakıtı, biyoyağ hariç katkılar ve motorin karışımını temsil eden ABSM yakıtı ve esas test yakıtı olan P5A3B5M yakıtının kullanılması iktiza etmiştir. Motor deneyleri her 3 yakıt için de sabit devirde, sabit sıkıştırma

oranında ve %25, %50, %75 ve %100 yük koşullarında olmak üzere 4 farklı yükte gerçekleştirilmiş, yakıtların ölçülen ve hesaplanan performans, emisyon ve yanma karakteristik değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda biyoyağ hariç karışımı temsil eden ABSM yakıtı, M100 yakıtına göre ortalama olarak; CO emisyonlarında %38,25, NO emisyonlarında %45,93, NO<sub>2</sub> emisyonlarında %36,72 ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında %44,57 oranlarında azalma sağlamıştır. Bunun yanında ABSM yakıtının biyoyağ katkılı versiyonu olan P5A3B5M yakıtı, ABSM yakıtına göre CO, NO, NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında sırasıyla %26,02, %52,27, %33,19 ve %48,82 oranlarında artışa sebep olmuştur. Sonuç olarak pirolitik biyoyağ, CO, NO, NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırıcı yönde etki göstermesine karşın yakıt karışımı içeriğinde bulunan çözücülerin emisyonları düşürücü etkisi daha baskın olduğundan P5A3B5M yakıtı M100 yakıtına göre CO, NO, NO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla; %22,19, %17,66, %15,72 ve %17,51 oranlarında azalma göstermiştir.

- Motor testlerinden elde edilen veriler ile hesaplanan özgül yakıt sarfiyatı değerleri göstermiştir ki; tüm test yüklerinin ortalamasında ABSM yakıtının kullanılması, M100 yakıtına göre özgül yakıt sarfiyatını %1,18 oranında artırırken, P5A3B5M yakıtı ise ABSM yakıtına göre özgül yakıt sarfiyatının %2,87 oranında artmasına sebebiyet verirken M100 yakıtına göre %4,09 oranında artışa neden olmuştur. Bu artışın sebebi motora katılan tüm katkıların sahip oldukları ısı değerlerinin motorinin ısı değerinden düşük olmasıdır.
- Özgül enerji sarfiyatı değerlerine bakıldığında ise tüm test yüklerinin ortalamasında ABSM yakıtının özgül enerji sarfiyatı değeri M100 yakıtına göre %1,21 oranında azalma gösterirken, P5A3B5M yakıtının özgül enerji sarfiyatı değeri M100 yakıtına nazaran %0,51, ABSM yakıtına göre %1,28 oranında artış göstermiştir. ABSM yakıtının gösterdiği azalmanın sebebi düşük yoğunluğu ve yüksek oksijen içeriği olurken, pirolitik biyoyağ katkılı P5A3B5M yakıtının gösterdiği artışın sebebi görece yüksek yoğunluğu ve görece düşük ısı değeri olarak yorumlanabilir.

Netice olarak pirolitik biyoyağın, çözücü kullanılmadan tek başına motorin katkısı olarak kullanılması durumunda performans, emisyon ve yanma karakteristiği değerlerinin olumsuz yönde etkileneceği aşikardır. Fakat bu deneyler yapılırken biyoyağın herhangi bir indirgeme, yükseltgeme işlemine tabi tutulmadan doğrudan piroliz reaksiyonundan elde edildiği şekliyle kullanıldığı da göz ardı edilmemelidir. İlerleyen çalışmalarda pirolitik biyoyağın içten yanmalı motorlarda kullanımına yönelik yapılabilecek çalışmalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çeşitli indirgeme ve yükseltgeme reaksiyonlarına tabi tutularak, elde edilen biyoyağın bazı olumsuz özelliklerinin giderilerek yakıt katkısı olarak kullanım olanaklarının detaylı bir şekilde araştırılması önerilir.
- Beri yandan çözücülerin kullanıldığı durumda, çözücülerin ve biyoyağın birbirlerinin performans, emisyon ve yanma karakteristiği değerlerini kötü yönde etkileyen özelliklerini telafi etmeleri münasebetiyle yakıt katkısı olarak kullanımının bu değerleri olumlu yönde etkilediği de deneyler sonucunda görülmüş bir gerçektir. Bu hususların ileride yapılacak çalışmalarda göz önünde bulundurularak daha kapsamlı araştırılması önerilir.
- Dizel motorların en önemli emisyonlarından biri olan partikül madde emisyonları ve daha önemlisi kükürt dioksit emisyonlarıdır. İleri ki çalışmalarda bu parametrelerin de dikkate alındığı araştırmalar yapılması önerilir.
- P5A3B5M yakıtının yakıt testlerinde kükürt içeriği saf motorine nazaran bir hayli yüksek çıkmıştır ki, bu yüksekliğin kükürt dioksit emisyon değerlerinde de gözlemleneceği şüphesizdir. Bu sebeple ilerleyen çalışmalarda pirolitik biyoyağın kükürt içeriğinin azaltılması yönünde prosesler üzerinde durulmalıdır.
- Bu çalışmada, piroliz işleminde katalizör kullanılmamıştır. Farklı katalizörlerin kullanımıyla sıvı ürün veriminin ve yakıt özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür. Bu yönde kapsamlı çalışmalar yapılması önerilir.
- Viskozite, yoğunluk, ısıl değer ve oksijen içeriği gibi bazı yakıt özellikleri dikkate alınarak, birçok piroliz parametresinin optimize edilmesine yönelik çalışmaların yapılması önerilir.

## KAYNAKÇA

- Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., Husin, W. N. W., Sahu, J. N. (2011). Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1863–1872. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.033>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Algayyim, J. M., Wandel, A. P. (2020). Performance and emission levels of butanol, acetone-butanol-ethanol, butanol-acetone/diesel blends in a diesel engine, *Biofuels*, doi: 10.1080/17597269.2020.1759178
- Aslantaş, A. (2018). Dünya’da ve türkiye’de biyokütle enerjisinin kullanımı ve potansiyeli. Yüksek Lisans Tezi.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Massachusetts: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20099-7>
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. Massachusetts: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- Bridgwater, A. V. (2015). "Pyrolysis of Biomass". Swaaij, W.V.-Kersten, S.-Palz, K. (eds.). in: *Transformations to Effective Use : Biomass Power For The World* (s. 473-573). Abingdon: Pan Stanford.
- Budak, M. S. (2017). Biyokütleden hızlı piroliz yöntemi ile biyoyakıt eldesi. Yüksek Lisans Tezi.
- Chiaromonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A.V., Grimm, H.P., Soldaini, I., Webster, A., Baglioini, P. (2003). Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines-Part 1: emulsion production. *Biomass & Bioenergy*, PII: S0961-9534(02)00183-6
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet’s future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2239–2249. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>

- Duku, M. H., Gu, S., Hagan, E. Ben. (2011). A comprehensive review of biomass resources and biofuels potential in Ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.033>
- Erdoğdu, A. E. (2018). Vakum piroliz ve sabit yataklı piroliz üniteleri kullanılarak hayvansal atıkların pirolizi ve işlemlerin tepki yüzey metodolojisi ile optimizasyonu. Doktora Tezi.
- Goyal, H. B., Seal, D., Saxena, R. C. (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 504–517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>
- Gunasekar, N., Mohan, C. G., Prakash, R., Kumar, L. S. (2021). Utilization of coconut shell pyrolysis oil diesel blends in a direct injection diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 45, 713–717. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.744>
- Hossain, A. K., Davies, P. A. (2013). Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 165–189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.031>
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T. J. (2016). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- Laesecke, J., Ellis, N., Kirchen, P. (2017). Production, analysis and combustion characterization of biomass fast pyrolysis oil – Biodiesel blends for use in diesel engines. *Fuel*, 199, 346–357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.093>
- Liu, C., Wang, H., Karim, A. M., Sun, J., Wang, Y. (2014). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Chemical Society Reviews*, 43(22), 7594–7623. <https://doi.org/10.1039/c3cs60414d>
- Lu, H., Ip, E., Scott, J., Foster, P., Vickers, M., Baxter, L. L. (2010). Effects of particle shape and size on devolatilization of biomass particle. *Fuel*, 89(5), 1156–1168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.023>
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>

- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118. <https://doi.org/10.17509/ijost.v4i1.15806>
- Ndukwu, M. C., Horsfall, I. T. (2020). Prospects of Pyrolysis Process and Models in Bioenergy Generation: a Comprehensive Review. *Polytechnica*, 3(1–2), 43–53. <https://doi.org/10.1007/s41050-020-00024-4>
- Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S.C., Dussap, C.G., Gnansounou, E. (2011). *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes*. Massachusetts: Academic Press.
- Park, W. C., Atreya, A., Baum, H. R. (2010). Experimental and theoretical investigation of heat and mass transfer processes during wood pyrolysis. *Combustion and Flame*, 157(3), 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.10.006>
- Pattiya, A. (2018). "Part One Pyrolysis". Lasse Rosendahl (ed.) in: *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications* (s. 1-65). Sawston: Woodhead Publishing.
- Saxena, R. C., Adhikari, D. K., Goyal, H. B. (2009). Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.011>
- Shah, M. A., Khan, N. S., Kumar, V., Qurashi, A. (2021). Pyrolysis of walnut shell residues in a fixed bed reactor: Effects of process parameters, chemical and functional properties of bio-oil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105564. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105564>
- Sharma, A., Pareek, V., Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis - A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193>
- Sikarwar, V. S., Zhao, M., Fennell, P. S., Shah, N., Anthony, E. J. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 189–248. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.04.001>
- State, R. N., Volceanov, A., Muley, P., Boldor, D. (2019). A review of catalysts used

- in microwave assisted pyrolysis and gasification. *Bioresource Technology*, 277(November 2018), 179–194. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.036>
- TEPGE. (2020). KAYISI ÜRÜN RAPORU 2020.
- Tezara, C., Siregar, J. P., Lim, H. Y., Fauzi, F. A., Yazdi, M. H., Moey, L. K., Lim, J. W. (2016). Factors that affect the mechanical properties of kenaf fiber reinforced polymer: A review. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10(2), 2159–2175. <https://doi.org/10.15282/jmes.10.2.2016.19.0203>
- Thamizhvel, R., Suryavarman, K., Velmurugan, V., Sethuraman, N. (2021). Comparative study of gasification and pyrolysis derived from coconut shell on the performance and emission of CI engine. *Materials Today: Proceedings*, 47, 978–983. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.350>
- Uzun, H., Yıldız, Z., Ceylan, S., (2019). Fast pyrolysis of biomass mixtures in a fixed bed reactor: Characterization of bio-oil product. *Environmental Research & Technology*, 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.1021/cen-v080n024.p020>
- Varma, A. K., Mondal, P. (2018). Pyrolysis of pine needles: effects of process parameters on products yield and analysis of products. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2057–2072. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6727-0>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Yang, S. I., Hsu, T. C., Wu, C. Y., Chen, K. H., Hsu, Y. L., Li, Y. H. (2014). Application of biomass fast pyrolysis part II: The effects that bio-pyrolysis oil has on the performance of diesel engines. *Energy*, 66, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.057>
- Yorgun, S., Yıldız, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: Effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.003>
- Yıldız, Z., Ceylan, S. (2018). Pyrolysis of walnut shell biomass in fluidized bed reactor: Determination of optimum conditions for bio-char production. *Environmental Research & Technology*, 1(4), 47–51.

<https://doi.org/10.1021/cen-v080n024.p020>



## ÖZ GEÇMİŞ

Gürkan KARA, İstanbul Kırımlı Fazilet OLCAY Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladığı Yüksek Lisans eğitimine 2020 yılında yatay geçiş yaptığı Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda devam etmiştir. 2020 yılından beri Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

### İletişim Bilgileri

ORCID ID: 0000-0003-0365-3827

### Yayınlanmış Çalışmalar:

1. KARA, G., & ÖZCAN, H.(2021). “Kayısı Çekirdeği Kabuğundan Piroiliz İle Biyoyağ Üretimi”, IV. Ulusal Mühendislikte Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi, 23-26 Aralık 2021, Tokat, Türkiye.