

**MEŞE PALAMUDU (QUERCUS ITHABURENSIS)'NDAN  
PİROLİZ YÖNTEMİYLE  
YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emirhan YELEKİN**

**Danışman**

**Prof. Dr. İbrahim MUTLU**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Ocak 2022**

Bu tez çalışması 21.FEN.BİL.05 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MEŞE PALAMUDU (QUERCUS ITHABURENSIS)'DAN**  
**PİROLİZ YÖNTEMİYLE**  
**YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU**

**Emirhan YELEKİN**

**Danışman**

**Prof. Dr. İbrahim MUTLU**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Ocak 2022**

## TEZ ONAY SAYFASI

Emirhan YELEKİN tarafından hazırlanan "Meşe Palamudu (*Quercus Ithaburensis*)'ndan Piroлиз Yöntemiyle Yakıt Üretiminin Optimizasyonu" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 21/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda** **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. İbrahim MUTLU

**Başkan** : Doç. Dr. Ahmet KESKİN  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Bolu Meslek  
Yüksekokulu

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

**Üye** : Prof. Dr. İbrahim MUTLU  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

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

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

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

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

**beyan ederim.**

**21 / 01 / 2022**



**Emirhan YELEKİN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MEŞE PALAMUDU (QUERCUS ITHABURENSIS)'NDAN PİROLİZ YÖNTEMİYLE YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU

Emirhan YELEKİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. İbrahim MUTLU

Bu günlerde fosil yakıtların kullanımının yoğun bir şekilde olmasıyla alternatif enerji kaynağı arayışı sürekli devam etmektedir. Bu bağlamda yapılan çalışmada, biyokütle kaynaklarından olan meşe palamudu (*Quercus Ithaburensis*) biyoyakıt için alternatif enerji kaynağı olarak düşünülmüş ve piroliz yöntemi vasıtasıyla pirolitik yağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Ürünler 4 farklı parametre koşullarıyla optimize edilmiştir. Bu parametreler, sıcaklık, sürükleyici azot gazı akış hızı, tanecik boyutu ve ısıtma hızıdır. Yapılan optimizasyon çalışmasında en uygun pirolitik yağ üretim koşulları; 500 °C sıcaklık, 1 L/dak sürükleyici azot gazı akış hızı, 0-2 mm tanecik boyutu, 10 °C/dak ısıtma hızı ve 30 dakika sabit alıkoyma süresi olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu üretim şartları ile üretilen pirolitik yağ miktarı en yüksek kütle oran olarak %19,40 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen pirolitik yağın fiziksel özelliklerinden yoğunluk 1,089 g/cm<sup>3</sup>, 40°C için kinematik viskozite 9,20 mm<sup>2</sup>/s, su oranı 2,72 mg/kg ve kükürt oranı 0,47 ppm olarak bulunmuştur.

**2022, ix + 41 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Piroliz, Biyoyakıt, Optimizasyon, Meşe palamudu

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **THE OPTIMIZATION OF PRODUCING FUEL FROM ACORN WITH PYROLYSIS METHOD**

Emirhan YELEKIN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Prof. Ibrahim MUTLU

Nowadays, with the intense use of fossil fuels, the search for alternative energy sources continues. In this context, in this study, acorn (*Quercus Ithaburensis*), which is one of the biomass sources, was considered as an alternative energy source for biofuel and pyrolytic oil was produced by the pyrolysis method. The products are optimized with 4 different parameter conditions. These parameters are temperature, entraining nitrogen gas flow rate, particle size and heating rate. In the optimization study, the most suitable pyrolytic oil production conditions; It was determined as 500 °C temperature, 1 L/min entraining nitrogen gas flow rate, 0-2 mm particle size, 10 °C/min heating rate and 30 min fixed retention time. It was determined that the amount of pyrolytic oil produced with these determined production conditions was 19.40% as the highest mass ratio. From the physical properties of the obtained pyrolytic oil, the density was 1.089 g/cm<sup>3</sup>, the kinematic viscosity at 40°C was 9.20 mm<sup>2</sup>/s, the water ratio was 2.72 mg/kg, and the sulfur ratio was 0.47 ppm.

**2022, ix + 41 pages**

**Keywords:** Pyrolysis, Biofuel, Optimization, Acorn

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her koşulda sonsuz ilgilerini, desteğini ve emeğini bizlerden hiç esirgemeyen Sayın Prof. Dr. İbrahim MUTLU hocama teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın başından sonuna kadar benimle tüm bilgi birikimini paylaşan saygıdeğer Prof. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN hocama, Sayın Öğr. Gör. Dr. Arif Hakan YALÇIN hocama, Sayın Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YAVUZ hocama teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda beni maddi olarak 21.FEN.BİL.05 numaralı proje ile destekleyen Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine teşekkürlerimi sunarım.

Yapmış olduğum laboratuvar çalışmalarımda bana teknik anlamda her zaman desteğini esirgemeyen Tekniker Mehmet AKTÜRK'e teşekkür ederim.

Tezimin her evresinde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Yüksek Mühendis Mehmet DURAK'a ve saygı değer dostum Emre KUZUCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm eğitim öğretim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen, her koşulda yanımda bulunup bana tüm değerlerimi kazandıran değerli aileme saygılarımı sunar sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Emirhan YELEKİN  
Afyonkarahisar 2022

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
RESİMLER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Meşe Palamudu (Quercus Ithaburensis) .....	3
2.2 Literatür Çalışmaları .....	3
2.3 Enerji ve Enerji Kaynakları .....	7
2.3.1 Yenilenemeyen enerji kaynakları .....	8
2.3.2 Yenilenebilir enerji kaynakları .....	9
2.3.2.1 Güneş enerjisi .....	9
2.3.2.2 Hidrolik enerji .....	9
2.3.2.3 Rüzgâr enerjisi .....	10
2.3.2.4 Jeotermal enerji .....	10
2.3.2.5 Biyokütle enerjisi .....	10
2.4 Piroliz işlemi .....	12
2.4.1 Pirolizi etkileyen faktörler .....	13
2.4.1.1 Piroliz sıcaklığının etkisi .....	13
2.4.1.2 Parçacık boyutunun etkisi .....	13
2.4.1.3 Isıtma hızının etkisi .....	13
2.4.1.4 Sürükleyici azot gazı akış hızı .....	14
2.5 Pirolitik yağ özellikleri .....	14
2.5.1 Viskozite .....	14
2.5.2 Yoğunluk .....	14
2.5.3 Setan sayısı .....	14
2.5.4 Su içeriği .....	15
2.5.5 Kükürt içeriği .....	15



3. MATERYAL METOT.....	16
3.1 İş akış şeması.....	16
3.2 Çalışma düzeneği ve kullanılan ekipmanlar .....	16
3.2.1 Meşe palamudu (Quercus ithaburensis) .....	17
3.2.2 Piroliz cihazı .....	17
3.2.3 Hassas terazi .....	18
3.2.4 Ayırma hunisi .....	19
3.2.5 Evaporatör .....	19
3.2.6 Diklorometan .....	20
3.3 Pirolitik yağ üretim yöntemleri .....	20
4. BULGULAR.....	28
4.1 Sürükleyici gaz akış hızının ürün oranına etkisi .....	28
4.2 Tanecik boyutunun ürün oranına etkisi .....	30
4.3 Sıcaklığın ürün oranına etkisi.....	31
4.4 Isıtma hızının ürün oranına etkisi .....	32
4.5 Pirolitik yağın özellikleri .....	34
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	35
6. KAYNAKLAR .....	36
ÖZGEÇMİŞ.....	41

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
N <sub>2</sub>	Nitrojen
NO <sub>x</sub>	Nitrojendioksitler
CO	Karbonmonoksit
HC	Hidrokarbon

### Kısaltmalar

---

EGS	Egzoz gaz sıcaklığı
GC-MS	Gaz kromatografisi kütle spektrometresi
F10	Hacimsel olarak %10 pirolitik yakıt + %90 dizel yakıtı
FEV	Fren efektif verimi
FT-IR	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
RSM	Cevap yüzeyi metodu
TGA	Termogravimetrik analiz
TUAM	Teknoloji uygulama ve araştırma merkezi
YSA	Yapay sinir ağları metodu

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji türleri. ....	9
Şekil 2.2 Biyokütle madde kaynaklarının sınıflandırılması. ....	11
Şekil 2.3 Klasik ve modern biyokütle ayrımı. ....	12
Şekil 3.1 İş akış şeması. ....	16
Şekil 4.1 Sürükleyici gaz akış hızının ürünlerin kütleli oranına etkisi. ....	29
Şekil 4.2 Tanecik boyutunun ürünlerin kütleli oranına etkisi. ....	31
Şekil 4.3 Sıcaklık farklarında oluşan ürünlerin kütleli orana etkisi. ....	32
Şekil 4.4 Isıtma hızından oluşan farkların kütleli orana etkisi. ....	33

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 4.1</b> Optimizasyon çalışma planı.....	28
<b>Çizelge 4.2</b> 400°C’de gaz akış hızına bağlı oluşan ürünlerin oranı. ....	29
<b>Çizelge 4.3</b> 400 °C’de parçacık boyutuna bağlı oluşan ürünlerinin oranı. ....	30
<b>Çizelge 4.4</b> Sıcaklığa bağlı oluşan ürünlerin oranı.....	31
<b>Çizelge 4.5</b> Isıtma hızına bağlı oluşan ürünlerin oranı. ....	33
<b>Çizelge 4.6</b> Pirolitik meşe palamudu yağının analiz özellikleri ve dizelle karşılaştırılması.....	34

## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 3.1</b> Meşe palamudu ( <i>Quercus ithaburensis</i> ).....	17
<b>Resim 3.2</b> Piroliz reaktörü.....	18
<b>Resim 3.3</b> SF-400C dijital hassas terazi.....	18
<b>Resim 3.4</b> Ayırma hunisi.....	19
<b>Resim 3.5</b> Evaporatör cihazı.....	19
<b>Resim 3.6</b> Diklorometan.....	20
<b>Resim 3.7</b> Öğütme makinesi.....	21
<b>Resim 3.8</b> Numunelerin hassas terazide tartılması.....	21
<b>Resim 3.9</b> 0-2 mm elekte elenmiş meşe palamudu.....	22
<b>Resim 3.10</b> 2-4 mm elekte elenmiş meşe palamudu.....	22
<b>Resim 3.11</b> 4-6 mm elekte elenmiş meşe palamudu.....	23
<b>Resim 3.12</b> Piroliz sonrası elde edilen kömür.....	24
<b>Resim 3.13</b> Pirolitik yağ ve su karışımının ayrıştırma işlemi.....	25
<b>Resim 3.14</b> Karışımın filtrelene işlemi.....	25
<b>Resim 3.15</b> Evaporatör ile diklorometan ayrıştırma işlemi.....	26
<b>Resim 3.16</b> Üretilen toplam pirolitik yağ.....	27

## 1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihi boyunca hayatta kalmak ve yaşam döngüsünü devam ettirebilmek için önemli bir etken olmuş ve olmaya da devam etmektedir. Enerji denilince ilk akla gelen yenilenemez enerji kaynakları olan fosil yakıtlar gelmektedir. Gelişen teknolojinin imkânları ile fosil yakıtlara ihtiyaç oldukça artmıştır. Dünyada enerji tüketiminin yanı sıra üretiminde de fosil yakıt kullanımı sınırlı olduğu için alternatif enerji kaynakları arayışına yönelim artmıştır (Abdeshahian vd. 2016).

Biyokütle enerjisi, 2017 yılında tüketimi yapılan toplam enerji miktarının %12,4'lük bir kısmını kaplamaktadır. Bu oranın %7,4'lük payını geleneksel biyokütle dediğimiz yakıtlar, evsel olarak kullandığımız ısınma ve yemek ihtiyacı için kullandığımız biyokütle kaynakları oluşturmaktadır. %5 oranlık bir pay ile modern biyokütle kullanılmaktadır. Modern biyokütlenin, %2,2'sini sanayide kullanılan ısınma, %1,4'ünü evlerdeki ısınma, %1'ini ulaşım ve %0,4'ünü biyokütle kaynaklı elektrik enerjisi oluşturmaktadır (Namal 2018).

Geçmişte biyokütle enerjisinin işlevleri ısınma ve hayvan yetiştiriciliğinde besleme olarak sınırlıyken günümüzde işlem görerek kullanım alanı genişlemiştir. Biyokütle, çeşitli işlemlerden geçerek katı, sıvı ve gaz haline dönüştürülebilmektedir. Bu da elektrik üretimi, ısınma ve motorlu taşıt yakıtı olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Aslantaş 2018).

Esterfikasyon, gazlaştırma, metanasyon, fermantasyon, karbonizasyon, fotofermantasyon ve piroliz biyokütlenin dönüşüm teknolojileridir. Bu teknolojiler kullanılarak, biyodizel, biyoetanol ve biyogaz gibi farklı yakıtlar elde edilebilmektedir (Karaosmanoğlu 2006). Bununla birlikte biyokütlenin verimlilik kazancı ve teknolojik ilerlemeleri kayıt altına alındığında gazlaştırma, yanma ve piroliz yaygın biçimde kullanılmaktadır (Kar 2018, Achinas vd. 2017).

Piroliz, oksijensiz ortamda oluşan termal bir olaydır. Meydana gelen sıcaklıktan dolayı oluşan ayrışmalar sonucunda; pirolitik yağ, katı ve gazdan oluşan üç ana ayrışma ürünü

ortaya çıkmaktadır. Piroliz ile yapılan çalışma ortamlarında, değiştirilen şartlarla alınan ürün verimi değiştirilebilir. Buna örnek olarak artan sıcaklık ve az ısıtma miktarı, biyokütlenin gaz formuna geçişini artırır. Uygun sıcaklık ve bekleme süresi uzun olan bir üretimde gaza dönüşen miktar artar. Uygun sıcaklık ve uygun bekleme süresinde elde edilen pirolitik yağ verimi daha çok olmaktadır. Pirolitik yağ üretiminde birçok üretim parametresi mevcuttur. Örneğin, hammadde seçerken tanecik boyutu ve biyokütlenin tipi, tepkime koşullarında sıcaklık, basınç ve ısıtma hızı rol oynamaktadır. Tepkime koşulları ve hammadde seçimlerinin farklı konfigürasyonlarıyla biyokütle üretimi farklı miktarlarda yapılabilmektedir (Bridgwater 2003, Kan vd. 2016, Kar 2018).

Yapılan bu çalışmada, kaynak seçimi olarak biyokütle olan meşe palamudunun (*Quercus Ithaburensis*) alternatif enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi amacıyla sabit yataklı bir piroliz reaktöründe pirolitik yağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Pirolitik yağ üretiminde kullanılan parametreler, sıcaklık, tanecik boyutu, ısıtma hızı, akış gazı hızı ve alıkoyma süresi değiştirilerek pirolitik yağ üretim koşullarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretim sonucunda elde edilen pirolitik yağ fiziksel özelliklerinden, yoğunluk, 40°C için kinematik viskozite, su oranı ve kükürt oranı tespiti için bir dizi analizlere tabi tutulmuştur.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Meşe Palamudu (*Quercus Ithaburensis*)

Meşe palamudu, Fagaceae ailesine mensup bir ağaçtır. *Quercus pedunculata* ağacı ile eş familyadadır. Meşe palamudu ağacının boyu 35-40 metreye kadar uzayabilir ve 800 yıla kadar yaşayabilir. Çiçek oluşumları tek eşeyli yapıya sahiptir. Meşe palamudu meyvesi 3-7 santimetre uzunlukta ve 2-3 santimetre genişliktedir. Meşe palamudu ağaçları, 1800 metre rakımlarda bulunan topraklarda sıkça bulunmaktadır.

### 2.2 Literatür Çalışmaları

Durak, yapmış olduğu çalışmasında; yabancı bir bitki olan sığırkuyruğu (*verbascum*) bitkisinden piroliz yöntemi ile pirolitik yağ üretimi yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmalarında optimum değerlere ulaşabilmek adına 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C üretim sıcaklıklarında, 0,5 L/dak, 1 L/dak ve 1,5 L/dak itici azot (N<sub>2</sub>) gazı akış hızında ve 5 °C/dak, 10 °C/dak ve 15 °C/dak ısıtma hızında optimizasyon çalışması yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmalar neticesinde en verimli üretim değerlerinin 500 °C sıcaklık, 0,5 L/dak itici azot (N<sub>2</sub>) gazı akış hızı ve 10 °C/dak ısıtma hızı olduğunu tespit etmiştir. Üretmiş olduğu pirolitik yağın özelliklerinin analiz sonuçlarında ise: 40 °C'deki kinematik viskozitesini 2,60 mm<sup>2</sup>/sn, yoğunluğunu 1,1358 g/cm<sup>3</sup>, kükürt oranını ağırlıkça %0,17 ve su oranını ağırlıkça %3 olarak bulmuştur (Durak 2021).

Yazar, yapmış olduğu çalışmada ceviz kabuğundan piroliz yöntemiyle pirolitik yağ üretim işlemi gerçekleştirmiştir. Çalışmasında üretmiş olduğu pirolitik yağın üretilmesinde; sıcaklık değeri, ısıtma hızı ve gaz akış hızının vermiş olduğu etkisini araştırarak optimizasyon çalışmaları yapmıştır. Çalışmalarında ısıtma hızını 10 °C/dak, sıcaklığı 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C değerlerinde azot gaz (N<sub>2</sub>) akış hızını ise 0,5 L/dak, 1 L/dak, 1,5 L/dak şartları altında gerçekleştirmiştir. Üretilen pirolitik yağ üretim şartlarının optimizasyonunda en düşük verimin 550 °C sıcaklıkta ve 1,5 L/dak gaz akışında olduğu gözlerken, en iyi verim şartlarının 500 °C sıcaklıkta ve 0,5 L/dak azot gazı (N<sub>2</sub>) akış hızında olduğunu belirlemiştir (Yazar 2019).



Açık, çalışmasında turunçgiller atığı olan turunç çekirdeğinden piroliz yöntemi kullanarak pirolitik yağ elde etmiştir. Pirolitik yağ üretiminde optimizasyon sağlamak için bir dizi çalışma yapmıştır. Bu bağlamda üretim sıcaklığını, itici gaz debisini ve dakikada ki ısıtma hızını değiştirerek sıvı, katı ve gaz faz olmak üzere üç farklı ürün elde etmiştir. Turunç çekirdeğinden elde etmiş olduğu pirolitik yağın; üretim sıcaklığını 550 °C, ısıtma hızını 5 °C/dak ve itici gaz debisini 0,5 L/dak olarak tespit etmiştir. Optimizasyon dışında, üretilen pirolitik yağın fiziksel özelliklerini belirlemek için analizlere tabi tutulup analiz sonuçlarına göre yoğunluk, kinematik viskozitesini, su oranını ve kükürt oranını tespit etmiştir (Açık 2019).

Akbulut, çalışmasında fındikkabuğunu kullanarak, piroliz işlemini sabit yataklı reaktörde gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında piroliz ürünlerinin verimlerini sıcaklık ve pirinç kabuğu ilavesi gibi parametrelerin etkisini araştırmıştır. Çalışmalarını 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C sıcaklıklarında, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 1 L/dak akış hızında sürükleyici azot gazı (N<sub>2</sub>) kullanarak gerçekleştirmiştir. Belirlemiş olduğu optimum sıcaklık değerinde %5, %10, %15 ve %20 pirinç kabuğu ilave ederek katı, yakıt, su ve gaz ürünlerin verimlerindeki değişimleri incelemiştir. %15 pirinç kabuğu ilavesinin F10 yakıtına göre verimde %85,09 bir artış sağladığını gözlemlemiştir. Dizel yakıtı kıyasla motor momenti ve motor gücünde azalma olduğunu, özgül yakıt tüketiminde ise artış olduğunu tespit etmiştir (Akbulut 2018).

Sezgin, yapmış olduğu çalışmasında; biyokütle kaynağı olarak domates, biber ve patlıcanı değerlendirmiştir. Çalışmasını karakterizasyon, termogravimetrik analiz (TGA) ve yapay sinir ağları yöntemi (YSA) başlıklarında gerçekleştirmiştir. Bu bağlamda yapmış olduğu hızlı piroliz çalışmasında elde ettiği verilerle iki farklı veri seti oluşturmuş ve bu veri setleriyle YSA mimarisi üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir. Oluşturduğu mimaride girdi parametresi olarak en az 4 en fazla 21 parametre kullanmıştır. Çalışmaları sonucunda geliştirmiş olduğu YSA modelinin çalışma öncesi ön uygulama olarak sıvı ürünlerin kullanılabilirliğini öngörmüştür (Sezgin 2021).

Kaygusuz, çalışmasında orman atıklarına hızlı piroliz işlemi ile 1,0 mm parçacık boyutuna getirilen biyokütle örneklerini 1:1:1 oranında karıştırarak biyokütle karışımı

elde etmiştir. Elde edilen bu biyokütle karışımına, sabit yataklı piroliz reaktöründe hızlı piroliz işlemi uygulanmıştır. Biyokütle karışımına uygulanan hızlı piroliz yönteminin ürün verimleri üzerine; sıcaklık, ısıtma hızı ve azot gazı akış hızının etkilerini incelemiştir. Hızlı piroliz çalışmalarını 1,0 mm sabit parçacık boyutunda; 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 750 °C sıcaklıklarda, 100 °C/dak, 250 °C/dak, 400 °C/dak ve 600 °C/dak ısıtma hızlarında ve 50 cm<sup>3</sup>/dak 100 cm<sup>3</sup>/dak, 200 cm<sup>3</sup>/dak ve 300 cm<sup>3</sup>/dak akış debilerinde gerçekleştirmiştir. Bu neticede yapmış 500 °C piroliz sıcaklık, 100 °C/dak ısıtma hızı ve 50 cm<sup>3</sup>/dak azot gazı akış hızında optimum verimi elde etmiştir. Hızlı pirolizde ürettiği ham biyoyağın ısı değeri hammaddesine kıyasla %40 arttığını gözlemlemiş ve 5900 cal/g olarak ölçmüştür (Kaygusuz 2020).

Özçiftçi ve Özbay, çalışmalarında mobilya endüstrisi atıklarından katalitik piroliz yöntemi ile biyoyakıt üretimini incelemişlerdir. Çalışmalarında sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) odun talaşını biyokütle kaynağı olarak kullanmışlardır. Pirolitik yağ üretimini sabit yataklı reaktörde yapmışlardır (Özçiftçi ve Özbay 2013).

Uslu, yapmış olduğu çalışmasında atık lastik piroliz yağı ile çalışan tek silindirli bir dizel motorunda, püskürtme basıncını 205 bar, 225 bar ve 245 bar değerlerinde ve motor yükünü %50, %75 ve %100 olacak şekilde farklı çalışma değerlerini yanıt yüzey metodolojisi ile incelemiştir. Analizler için kullanmış olduğu püskürtme basıncı, yakıt karışım oranı ve motor yükü parametrelerini ön değerlendirme çıktısı olarak kullanırken fren efektif verim (FEV), egzoz gaz sıcaklığı (EGS), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve is emisyonlarını çıkış parametreleri olarak kullanmıştır. Uygulamalarında cevap yüzey metodolojisinin; birçok girdisi ve çıktısı olan optimizasyon parametrelerinin sayısını azaltmada ve sonuç çıktısına ulaşmada güvenilir sonuçlar çıkaran bir yöntem olduğunu göstermiştir (Uslu 2019).

İsa ve arkadaşları, çalışmalarında parametre olarak piroliz sıcaklığını, ısıtma hızını, partikül boyutunu, alıkoyma süresini ve gaz akış hızını kullanarak pirinç kabuğu pirolizinden üretilen biyoyağ verimini optimize etmişlerdir. Yapmış oldukları İstatistiksel analizler neticesinde: Piroliz sıcaklığının, ısıtma hızının, partikül boyutunun ve alıkoyma süresinin biyoyağ verimini önemli ölçüde etkilediğini sunmuşlardır. RSM metodunu

kullanılarak bu dört faktör analiz etmiş ve 473,37 °C piroliz sıcaklığında, 100 °C/dak ısıtma hızında, 0,6 mm parçacık boyutunda ve 1 dakikalık tutma süresinde optimum koşulları belirlemişlerdir. Doğrulama çalışmaları kapsamında öngörülen değere (%48,10) kıyasla yaklaşık %0,04'lük bir sapma ile biyoyağ üretimi (%48,30 ve %47,80) gerçekleştirmişlerdir (İsa vd. 2011).

Çetişli, çalışmasında ömrünü tamamlamış lastiklerden sabit yataklı piroliz düzeneğinde katı, sıvı ve gaz ürünler elde etmiştir. Çalışmalarında iki farklı tip ömrünü tamamlamış lastik kullanan Çetişli; ısıtma hızını 5 °C/dak ve 10 °C/dak değerlerinde, sıcaklık değerlerini ise 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C olarak optimizasyon gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmalar sonucunda; çıkan karbon siyahı ve piroliz yağ miktarının optimum üretim koşulunun, 500 °C sıcaklıkta 10 °C/dak ısıtma hızında olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca üretmiş olduğu pirolitik yağ için elemental analiz, ısıl değer, kükürt tayini analizlerini, karbon siyahı için; elemental analiz ve ısıl değer analizlerini değerlendirerek çalışmasında kullanmış olduğu malzeme hakkında detaylı bilgiler sunmuştur (Çetişli 2013).

Akan, çalışmasında biyokütle kaynağı olarak sarı kantaron bitkisini kullanmıştır. Çalışmalarını sabit yataklı reaktörde basınçlı pirolizle gerçekleştirmiştir. Piroliz parametreleri olarak; sıcaklık, basınç ve ısıtma hızını değerlendiren Akan, çalışmalarını 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C ve 600 °C sıcaklık değerlerinde, 150 °C/dak, 300 °C/dak, 450 °C/dak, 600 °C/dak, 750 °C/dak ısıtma hızı ve 1, 11, 21, 31 ve 41 barlık basınçta yapmıştır. Elde ettiği sıvı ve katı ürünlerin üretim verimini RSM (Cevap yüzeyi metodu) tekniği kullanarak değerlendirmiştir. Sıvı ürün için optimum koşulların 513,13 °C sıcaklık, 1 bar basınç ve 489,40 °C/dak ısıtma hızında olduğunu not düşmüş ve bu koşullarda %32,98 verim elde etmiştir. Katı pirolitik üründe ise optimum koşulları; 400 °C sıcaklık, 41 bar basınç ve 150 °C/dak ısıtma hızı olarak not düşmüş ve %41,23'lük bir verim elde etmiştir (Akan 2013).

Karaaslan, çalışmasında biyokütle olarak, ham derinin bir atığı olan kromlu deri talaşı değerlendirmiş ve piroliz çalışması yapmıştır. Önce biyokütlenin ön değerlendirmelerini yapıp ardından deri atıklarını sabit yataklı reaktörde pirolize tabi tutmuştur. Piroliz

işleminin sonucunda sıvı fazda ürün elde etmiştir. Elde edilen sıvının verimi üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı, ısıtma hızı, alıkonma süresi ve katalizörün etkilerini öğrenmek için araştırmalar yapmıştır. Çalışmalar sonucunda elde etmiş olduğu veriler neticesinde: En yüksek sıvı ürün verimini %49 olarak, 20 dakika alıkonma süresinde, 500 °C piroliz sıcaklığında, 50 °C/dak ısıtma hızında 0,5 L/dak N<sub>2</sub> gaz akışında ve kütlece 1:1 biyokütle-katalizör oranıyla elde etmiştir. Ayrıca FT-IR ve GC-MS analizlerle sıvı ürünün yapısını incelemiş ve bu neticeler sonucunda elde edilen pirolitik sıvı ürünün alternatif yakıt olması ihtimalini düşünerek kalorifik değer ölçümlerini de yapmıştır. Seçilen ham deri atığının pirolizinden elde edilen sıvı ürünün hem yakıt hem de hammadde olarak kullanılabilceği sonucuna varmıştır (Karaaslan 2019).

### **2.3 Enerji ve Enerji Kaynakları**

Enerji, tarihin her sayfasında milletlerin vazgeçilmez kaynağı olmuştur. Gelişmelerin başında tarımsal faaliyet ve hayvancılık ağırlıktadır. Sanayileşme süreciyle birlikte enerji, ekonominin seyrini değiştirmiştir. Enerjinin kullanımı yaşam kalitesini arttırmıştır. Bu bağlamda sanayileşmenin de etkisiyle enerjiye olan ihtiyaç epeyce artmıştır (Aydın 2010).

Enerji her geçen gün insanoğlunun vazgeçilmezlerinden biri olmaya devam etmektedir. Enerji, kaynağına göre iki sınıfa ayrılmaktadır: Birincil ve ikincil enerji kaynağı. Kullanılan enerjinin farklı kaynaklarına göre bu şekilde ayrılması yenilenebilir ve yenilenemez enerjiler diye sınıflandırmamızı oluşturur. Bir başka deyişle kaynaklarına ve geri kazanımına göre birincil enerji kaynağı ve ikincil enerji kaynağı olarak isimlendirilir (Yıldırım 2019).

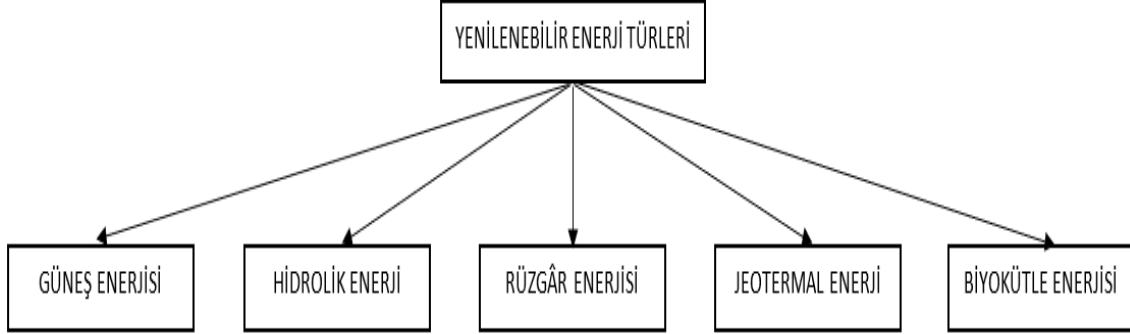
Kaynaklarına göre enerji ticari ve ticari olmayan kaynaklar olarak adlandırılabilir. Ticari kaynak, uluslararası ya da ulusal çapta ekonomik dengenin de içinde bulunduğu sanayileşmenin gereksinimini karşılayan enerjiyi oluşturur. Ticari olmayan enerji de konvansiyonel statüde kullanılan enerjidir. Ticari kaynağa örnek olarak petrol, nükleer enerji ve elektrik enerjisi, ticari olmayan kaynaklara örnek olarak da yakmalık odun, gübre vb. örnek verilebilir (Bilginoğlu 1991).

### 2.3.1 Yenilenemeyen enerji kaynakları

Enerji, en bilinen ibaresiyle yapılan iş veya ısı oluşturma yeteneğidir. Bu vasıta ile ortaya ısı, optik, kuvvet, kimyasal dönüşüm vb. farklı biçimlerde oluşur. Çeşitli kaynaklardan oluşturulmasıyla birçok tasniflemeye tutulmaktadır. Bu sınıflandırmalardan bir tanesi yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenemeyen enerji kaynaklarıdır. Yenilenemeyen enerji kaynakları, kullanıldığında biterek geri dönüşümü elde edilen iş nedeniyle sağlanamayan kaynaklardır. Başlıca yenilenemeyen enerji kaynakları, doğal gaz, kömür ve en önemlisi petrol gibi fosil yakıtlardır. Şu anda dünya üzerinde enerji kaynağı olarak ilk sırada fosil yakıtlar gelmektedir (Bhattacharyya 2011).

Fosil yakıtlar, enerji bakımından yenilenemeyen olmasının yanı sıra çevresel kirlilikleri sebebiyle de önemli rol oynar. Ancak doğa, içilebilir ve içilemez su kaynakları, ozon tabakası gibi tüm çevresel varoluşlar tüm insanlığın mal varlığındadır. Mesela alınan nefes ile kullanmış olduğumuz havanın hesabını kimse bize sormanın peşine düşmez. Kullanmış olduğumuz çevre, kirlenmekle yüz yüze kalırsa tüm insanlık kötü etkilenecektir. Kullanmış olduğumuz doğa, sadece benliğimizin değil tüm insanoğlunun ortak malı olduğu düşünülürse her olumsuz etken herkesi etkilemektedir. Burada en uygun çözümlerin hükümetler tarafından alınması hatta çevrenin kalitesi geliştirilebilmelidir. Bu bağlamda üreticiden tüketiciye tüm enerji kullanıcılarının vermiş olduğu zararlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bunların yanı sıra aşırı kullanımların oluşturduğu çevre kirliliği epeyce artmaktadır. Çevrenin olumsuz etkilenmesi nedeniyle oluşan negatif nedenler doğrultusunda oluşan maliyetler sosyal oluşum maliyetlerden daha azdır. Bu bağlamda hükümetlerin çevre politikalarını tekrar değiştirmesi gerekmektedir (Wallart 1999).

### 2.3.2 Yenilenebilir enerji kaynakları



Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji türleri.

Yenilenebilir enerji kaynakları kendini sürekli olarak yenileyen yani bilinen ya da belirli bir kullanım ömrü olmayan ve insanoğlunca tüketilip sonu gelmeyen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları; rüzgâr, dalga, biyokütle, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjisi gibi kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında büyük bir paya sahip kısmını güneş enerjisi oluşturmaktadır (Üçgül ve Elibüyük 2017).

#### 2.3.2.1 Güneş enerjisi

Güneşin yaymış olduğu ışık ve ısı kaynağı sayesinde elde edilen enerjiye güneş enerjisi denmektedir. Özellikle, canlıların tüm biyolojik yaşam koşullarının devamlılığını sağlamada büyük bir etkiye sahiptir. Günümüzde kullanılan birçok enerji üretiminde güneş vasıtasıyla oluşan tepkimelerin etkisi mevcuttur. Evrende, güneş enerjisi sayesinde bir döngü oluşmaktadır. Örneğin, sağlanan ışık ile gece ve gündüz dengesi, biyolojik tüm canlıları buna insan da dahil güneş enerjisinin sağladığı imkanlara ihtiyaç duymaktadır. Birçok kritik önem taşıyan bu enerji kaynağından enerji üretmek mümkündür (Üçgül ve Selbaş 2013, İnt. Kyn. 1).

#### 2.3.2.2 Hidrolik enerji

Suyun hayatımızın her evresinde olduğu gibi sudan oluşan enerji kaynakları; dalga enerjisi, okyanus enerjisi vb. enerji kaynaklarıdır. Belirli bir yükseklik almış sıvının

oluşturduğu potansiyel enerjiye hidrolik enerji denir. Oluşturulan bu enerjinin dönüşümü olarak dolaylı yoldan önce mekanik sonrasında kullanılan teçhizatlar ile elektrik enerjisiye dönüştürülmesine de hidroelektrik enerji denmektedir (Koç ve Kaya 2015).

### **2.3.2.3 Rüzgâr enerjisi**

Rüzgâr; coğrafi olarak dünya üzerinde oluşan çeşitli basınç değişikliklerinden meydana gelen hava olaylarıdır. Rüzgâr enerjisi havada oluşan değişik ısı alanlarının birbirleriyle karşılaşmasından meydana gelir. Burada kullanılan türbinler vasıtasıyla rüzgâr enerjisi, elektrik enerjisine dönüşür. Rüzgâr enerjisi çevreye herhangi bir olumsuz etki bırakmadığından ve her zaman kullanılabilir olmasından kaynaklı büyük bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanı sıra kullanılan türbin gibi büyük yerler kaplayan sistemler ve maliyetleri de dezavantajlarını oluşturmaktadır (Şengül vd. 2014).

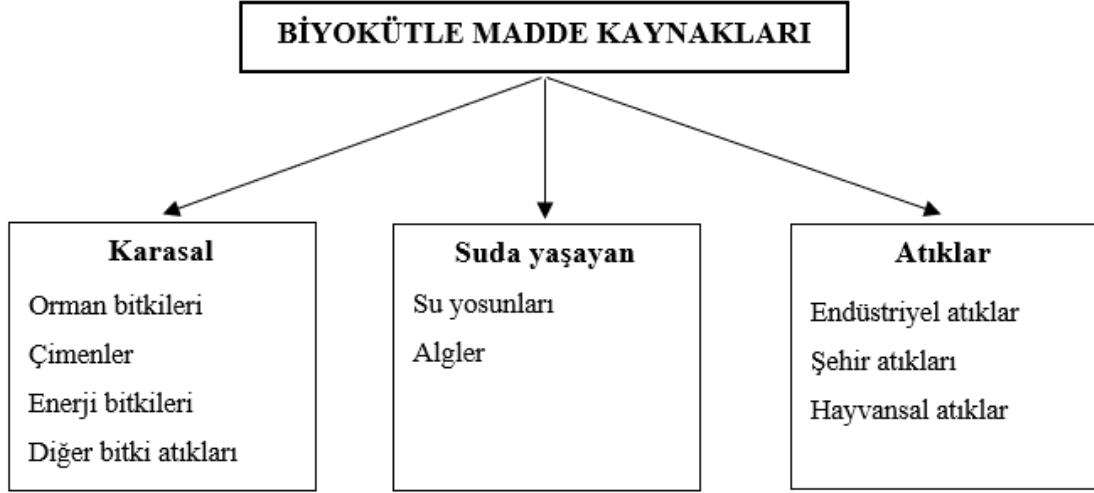
### **2.3.2.4 Jeotermal enerji**

Jeotermal enerji, toprağın altına indikçe sıcaklığı artan ve evrenin tüm evrelerinde ısısı kaybolmayan magmanın oluşturduğu enerjidir. Yeraltında bulunan su kaynaklarından sızan sıvılar gözenekli yapıya sahip kayalarda birikir. Kayalar üzerinde sıvının ısınarak dolaşmasından enerji üretmek mümkündür. Doğal oluşum kayalar bulunmasa da magmanın oluşturduğu sıvı devam ettiği sürece insan yapımı ısınan sıvının gezebileceği kayalar yapıldığında enerji üretmek olasıdır. Yapılan bu olaya “kızgın kuru kaya” sistemi denilmektedir (Erkul 2012).

### **2.3.2.5 Biyokütle enerjisi**

Biyokütle bitmesi mümkün olmayan, birçok yerde yetiştirilmesi yönünden kritik bir alternatif enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Fosil yakıtların dezavantajları ve kullanım ömürlerinin her geçen gün daha bitmeye yaklaşması biyokütle enerjisinin kullanımını daha önemli hale getirmektedir. Bileşen olarak hidrokarbonlar bulunduran hayvansal ve bitkisel bütün maddelerden elde edilen enerjiye biyokütle enerjisi denilmektedir (Kapluhan 2014). Biyokütle kaynakları çok çeşitli olması sebebiyle

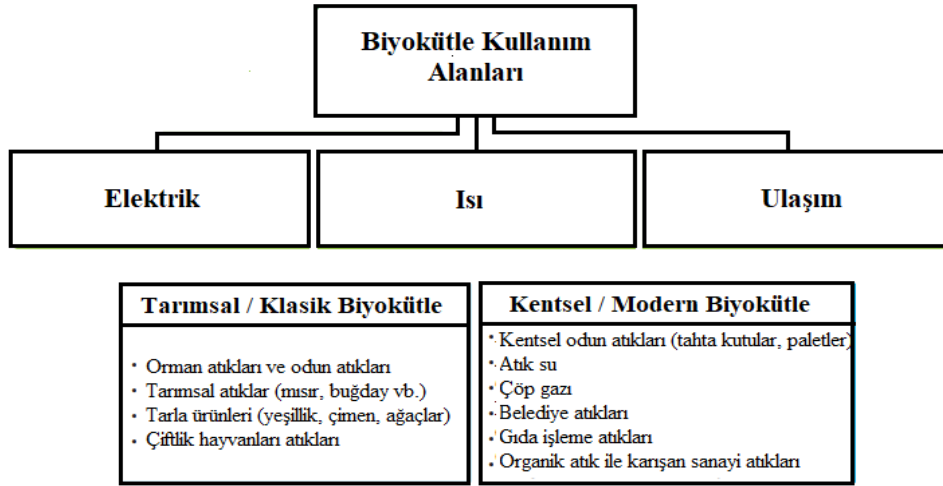
sınıflandırılmıştır. Şekil 3.1’de biyokütle kaynağı sayılan hammaddelerin sınıflandırılması mevcuttur (Sözen vd. 2017).



Şekil 2.2 Biyokütle madde kaynaklarının sınıflandırılması (Sözen vd. 2017).

Biyokütle enerjilerinin karasal, suda yaşayan ve atıklar olmak üzere üç ana başlık adı altında sınıflandırılmaktadır. Elde edilen enerjinin üretim yöntemine göre klasik ve modern biyokütle enerji üretimi bulunmaktadır. Modern biyokütle enerjisi, motorlu araçlarda kullanılan sıvı yakıtların (biyoetanol, biyodizel) oksijenli ya da oksijensiz ortamda ısıtılmasıyla elde edilen enerjidir. Klasik biyokütle ise daha çok gelişmekte olan ülkelerin gerekli birtakım ihtiyaçlarını karşılamada kullanmış oldukları odun, evsel atıklar vb. olarak adlandırılır (İnt. Kyn. 1).





Şekil 2.3 Klasik ve modern biyokütle ayrımı (Anonim 2014).

## 2.4 Piroliz işlemi

Piroliz organik maddelerin oksijensiz ortamda ısıtılması işlemidir. Verilen sıcaklıkla ısıtılan maddenin ayrıştırdığı farklı formdaki bileşenlerin biriktirilmesi ile sonuçlanır. Muhafaza edilmesi ve depolanması olmayan biyokütle kaynakları bu işlem sonrasında kolay taşınabilir bir sıvı forma getirilebilir (Bridgwater ve Grassi 1991, Çağlar 2004).

Piroliz işlemi kompleks bir yapıdadır. Isıtılma sonucunda buharların göstermiş olduğu özellikler uygulanan ısıtmanın hızına göre farklılık gösterir. Birincil buharlar sıcaklık ve tepkimeler sonucunda optimum süre bekletilmesiyle katrana ya da gaz fazındaki ürüne geçebilir. Örneğin: Kullanılan biyokütle kaynaklarına 500 °C’ de işleme sokulduğunda atom bağlarında rastgele farklı farklı yerleşmeler gösterir. Yapılan bu işlemler sonucunda kat, sıvı ve gaz fazda ürünler biriktirilme yoluyla elde edilebilmektedir. Piroliz işleminde oluşan bu ürünlerin yanı sıra farklı kimyasallar ya da su oluşur. Piroliz işlemleriyle oluşturulan pirolitik yakıtlar çeşitli sanayi sektörlerinde kullanılabilir. Bir dizel motorda yapay şekilde üretilen yakıt kullanılabilir. (Bridgwater ve Grassi 1991).

Oluşturulan katı, sıvı ve gaz formdaki ürünlerin kütleli verimleri birçok parametreye bağlıdır. Piroliz işlemleri yavaş ve hızlı piroliz olarak iki sınıfa ayrılabilir. Kullanılan bu iki yöntem elde edilen verim ve bileşen yönünden farklılık gösterir. Bekleme süresinin uzun olduğu ve ısıtma hızının düşük olduğu koşullarda elde edilen katı ürün maksimum

miktardadır. Maksimum düzeyde pirolitik yağ (sıvı) üretilmek istenildiğinde fazla ısıtma hızında yapılmalıdır (Bridgwater ve Grassi 1991).

#### **2.4.1 Pirolizi etkileyen faktörler**

##### **2.4.1.1 Piroliz sıcaklığının etkisi**

Piroliz sıcaklığı, kullanılan ürünün kimyasal özelliklerini oldukça önemli düzeyde etkiler. Yapılan çalışmada 600 °C'den yüksek sıcaklık değerlerinde, doğal yağlar ve oksidasyon tepkimesinden meydana gelen katı oluşumlar gaza dönüşmektedir. Pirolitik yağ veriminde genellikle 400 °C ila 550 °C sıcaklıklar arasından maksimum verim elde edilmektedir. 700 °C sıcaklık değerlerinin üstünde dehidrasyon tepkimelerinden kaynaklı pirolitik yağ içerisindeki karbon miktarını arttırmaktadır (Kan vd. 2016).

##### **2.4.1.2 Parçacık boyutunun etkisi**

Shen ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalarında Avustralya yağlı odunsu alternatif enerji kaynağı olan biyokütle kaynağından 500 °C sıcaklık değerinde 0,81-5,6 mm'lik tanecik boyutunun pirolitik yağına verimini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarda 0,3 mm tanecik boyutunu 1,5 mm'ye aldığı anda elde edilen pirolitik yağ miktarının azaldığını ortaya koymuşlardır (Shen vd. 2009).

##### **2.4.1.3 Isıtma hızının etkisi**

Isıtma süresinin hızı pirolizdeki tepkimelerin oluşumunda meydana gelecek olan nihai ürünün bileşenini de etkiler. Pirolizde oluşan tepkimeler oldukça geniş bir düzeyde gerçekleşir, bu sayede gerçekleştirilen hızlanmanın oluşturduğu etkiyle taşınım hızını artıran bozunma tepkimelerine girer. Başlangıcın etkisiyle elde edilen ürünlerin devamlı ısınmasıyla ikincil ürünler denilen farklı şekillerde ürünler meydana gelir. Hızlı ısıtmanın etkisiyle bu ikincil ürünler azalır, yavaş ısıtma koşullarında ise ikincil ürünlerin oluşmasına meydan vermektedir (Öztürk Tophanecioğlu 2009).

#### **2.4.1.4 Sürükleyici azot gazı akış hızı**

Durak, yapmış olduğu çalışması sonucunda itici azot gazı akış hızının artışı ile birlikte elde edilen katı (kömür) ürünün arttığını ancak bunun tersine oluşan buhar ürününün miktarında düşüş olduğunu belirtmiştir. Elde edilen sıvı ürün olarak suyun da 0,5 L/dak değerinden 1 L/dak değerine düşüşte oluşan su miktarının azaldığını göstermiştir. Bunun yanı sıra 1 L/dak değerinden 1,5 L/dak değerine arttırıldığında su miktarının arttığını gözlemlemiştir. Üretilen pirolitik yağ miktarı ise itici azot gazı akış hızında artış olduğunda üretilen pirolitik yağ miktarının azaldığını göstermiştir (Durak 2021).

### **2.5 Pirolitik yağ özellikleri**

#### **2.5.1 Viskozite**

Motorlu araçlar için püskürtme zamanında yakıtın optimum atomizasyon koşulu için önemli bir yere sahiptir. Biyoyağ viskozitesi dizele oranla 10 ila 15 kat daha fazladır. Biyoyağı dizel motorlarında biyodizel olarak değerlendirilmesinde yüksek viskoziteli olan yakıtın, yanmayı kötü etkilediğinden emisyona neden olmaktadır (Sakthivela vd. 2018).

#### **2.5.2 Yoğunluk**

Yoğunluk, birim özgül enerji miktarını ve ateşlemenin kalitesinin bir değeridir. Literatürde belirtilen yoğunluğun NO<sub>x</sub> emisyonları ile bir bağlantısı olduğu ile ilgili çalışmalar mevcut olup yoğunluk miktarı arttıkça azot oksit emisyonlarının arttığını göstermiştir (Boubacar Laouge 2020).

#### **2.5.3 Setan sayısı**

Motor performansını ve zararlı gaz emisyonlarını etkileyen faktörler arasında bir etken de setan sayısıdır. Yakıtta setan sayısı arttıkça oluşan tutuşmanın gecikme süresinin azaldığı belirtilmektedir. Literatürde yapılan araştırmaların birçoğunda; setan sayısının emisyonlarda ve motor performansında etkili olduğuna varılmıştır (Karakuş 2000).

#### **2.5.4 Su içeriği**

Dizel motorlarda kullanılan yakıtlarda bulunan su miktarı motora kritik derecede zararlar vermektedir. Yakıtın içerisindeki su bunların yanı sıra motor güç çekişinde de düşüşler oluşturmaktadır. Bu nedenle su içeriği biyodizel yakıtlarının içeriğinde istenmeyen bir maddedir (Okumuş ve Doğan 2019).

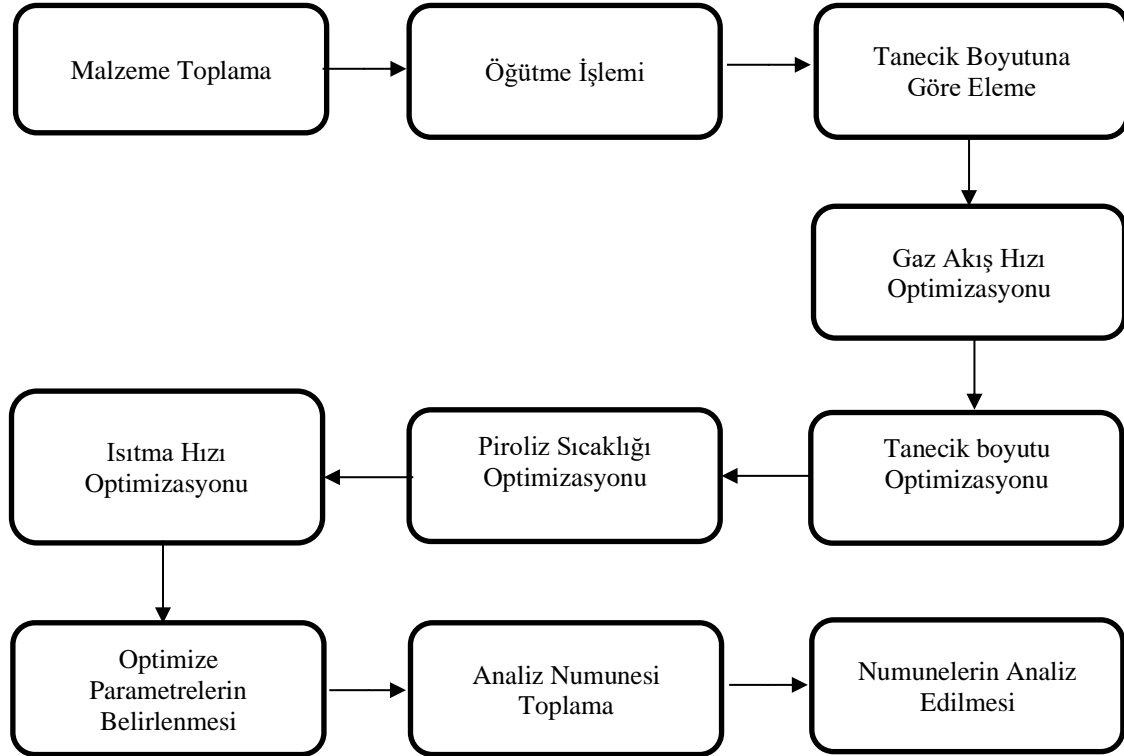
#### **2.5.5 Kükürt içeriği**

Ham petrolde kükürt doğal koşullarda bulunmaktadır. Rafineri çalışmaları sonucunda içeriğindeki kükürt miktarı eser miktarlara kadar indirgenebilir. Motorlarda kullanılan dizel yakıtın içerisinde bulunan kükürt, is emisyon oluşumunu kolay hale getirir. Bunun yanında yakıt içerisindeki kontrol ekipmanlarının çalışmasını etkilemektedir. Bu nedenle kükürt içeriği oluşan çeşitli zararlı emisyon parametrelerini de etkiler. Dizel yakıtlardaki kükürt içeriği 10 ppm sınır değerine kadar olan yakıtlar kükürtlü yakıt olarak değerlendirilir (Doğan 2012).

### 3. MATERYAL METOT

Sunulan bu çalışmada pirolitik yağ üretimi için piroliz yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların yürütülmesinde takip edilen tüm proses aşamaları ve bu amaçla kullanılan materyalin üretiminde izlenen yöntem belirtilmiştir.

#### 3.1 İş akış şeması



Şekil 3.1 İş akış şeması.

Yapılan bu deneysel çalışmaların tüm süreçleri ve kullanılan materyalin hazırlanması Şekil 3.1’de verilen iş akış şemasında gösterilmektedir.

#### 3.2 Çalışma düzeneği ve kullanılan ekipmanlar

Bu çalışmada, pirolitik yağın üretiminde biyokütle kaynağı olarak meşe palamudu (*Quercus Ithaburensis*) kullanıldı. Pirolitik yağ üretiminde parametre olarak parçacık boyutu, sıcaklık, itici gaz hızı ve ısıtma hızı kullanıldı. Bursa’nın Uludağ ormanlarından toplanan meşe palamutları çeşitli kurutma süreçlerinden sonra öğütme makinesi

yardımla parçalanarak öğütüldü ve elek kullanılarak 0-2mm, 2-4mm, 4-6mm ve 6+ mm olarak 4 ayrı boyutlarda sınıflandırıldı. Yapılan çalışmalar 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklık değerlerinde, 0,5 L/dak, 1 L/dak ve 1,5 L/dak itici azot gazı akış hızında 5 °C/dak, 10 °C/dak, 15 °C/dak ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.1 Meşe palamudu (*Quercus ithaburensis*)

Meşe Palamudu (*Quercus Ithaburensis*) Türkiye'nin özellikle batı ve kuzeybatı kesimlerinde oldukça fazla bulunan meşe ağacının sert kabuklu yaklaşık 3-5 cm büyüklüğünde meyvesidir. İki senede bir meyve oluşumu gerçekleşir. Güz aylarında olgunlaşan meyveler ağaç diplerine düşmektedir. Pirolitik yağ üretimi için belirlenen biyokütle kaynağı Bursa Uludağ ormanında bolca bulunan palamut meşesinden faydalanarak güz aylarında toplanmıştır. Ormanlarımızda bulunan meşe palamudu endüstriyel değeri olmamasının yanında orman atık ürünüdür. Bu bağlamda üretim maliyeti bulunmamaktadır. Resim 3.1'de Meşe Palamudu meyvesi görülmektedir.



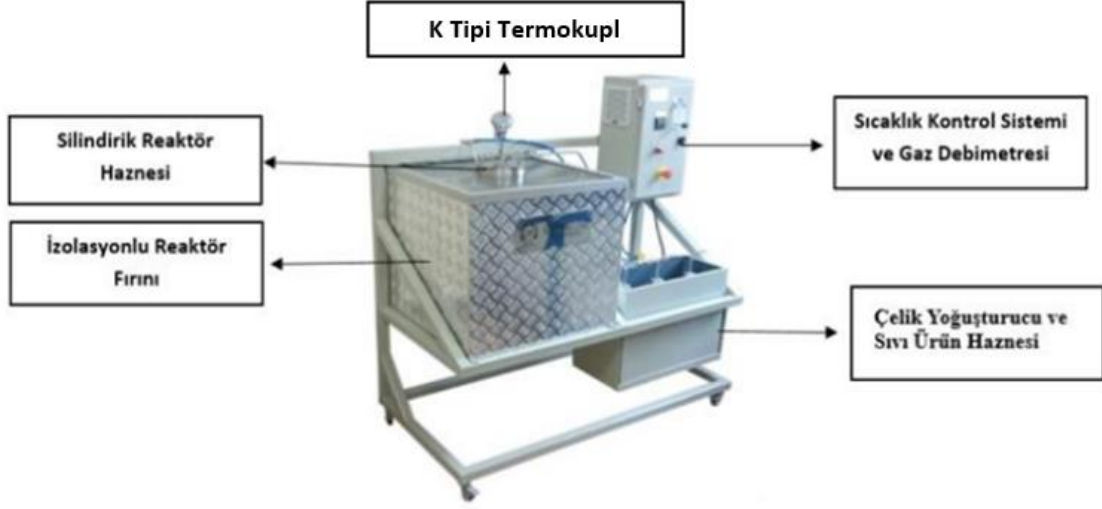
**Resim 3.1** Meşe palamudu (*Quercus ithaburensis*).

### 3.2.2 Piroliz cihazı

Doğal özelliklerdeki malzemelerin yüksek sıcaklıklarda oksijensiz ortamda yanması ile çeşitli fazlara (katı, sıvı ve gaz) ayrıştırılmasını sağlayan 5 ana parçadan oluşan sistemdir. Ayrıştırılan fazların birikmesi ile analiz numunelerinin toplanmasını sağlamaktadır.

Elektromanyetik uyumluluğu sayesinde farklı proses koşullarına entegre edilebilir. Bu

sayede farklı biyokütle kaynaklarının farklı parametre koşulları ile optimum şartlar belirlenebilmektedir. Resim 3.2’de meşe palamodu piroliz çalışmalarında kullanılan piroliz cihazının resmi görülmektedir.



**Resim 3.2** Piroliz reaktörü.

### 3.2.3 Hassas terazi

Çalışmalar sonucunda üretilen pirolitik yağ miktarını, su miktarını ve kömür miktarını ölçmede 500 gr ağırlık kapasiteli ve 0,01 ölçme hassasiyet özelliğine sahip aşağıdaki Resim 3.3’te gösterilen SF-400C dijital hassas terazi kullanılmıştır.



**Resim 3.3** SF-400C dijital hassas terazi.

### 3.2.4 Ayırma hunisi

Piroliz işlemi sonrasında oluşan özellikle ürünlerin (su ve pirolitik yağ) yanı sıra boru cidarlarında kalmış pirolitik yağın alınmasında kullanılan diklorometanın heterojen bir karışım ile karışması sonucunda su ile karışımın birbirinden ayrılması gerekmektedir. Cam yapıda ve silindirik şekilde olan ayırma hunisi sıvı karışımların akmadan sabit tutulabileceği ortam oluşması için bir açma kapama vanası bulundurmaktadır. Homojen şekilde karışan diklorometan ve pirolitik yağ ile heterojen karışım oluşturan suyu birbirinden ayırmak için kullanılacaktır.



**Resim 3.4** Ayırma hunisi.

### 3.2.5 Evaporatör

Homojen biçimde karışan diklorometan ve pirolitik yağ karışımından pirolitik yağın ayrıştırılabilmesi gerekmektedir. Pirolitik yağ üretiminde döndürme hızı 10 ila 295 rpm değerlerinde ve 20- 220 °C sıcaklık aralığında çalışabilen aşağıda Resim 3.5'te gösterilen Heidolph markasına ait G3 model evaporatör kullanılmıştır.



**Resim 3.5** Evaporatör cihazı.



### 3.2.6 Diklorometan

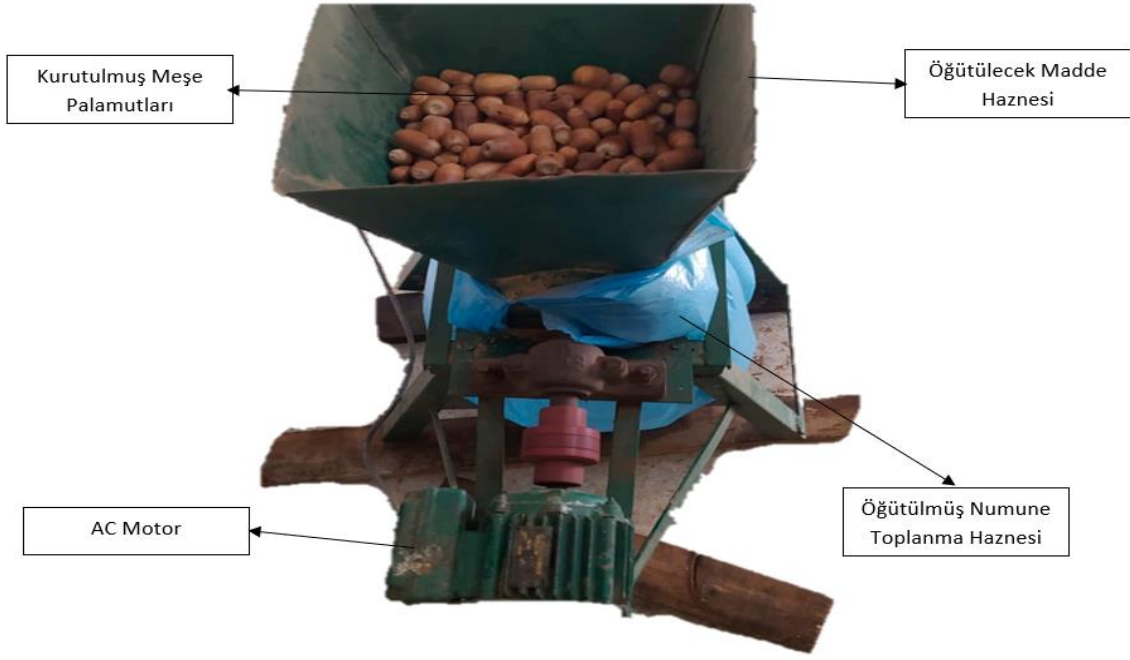
Diklorometan ya da metilen klorür diye de adlandırılan  $CH_2Cl_2$  formülüne sahip kaynama noktası 39,6 °C olan su ile karışmayan renksiz bir sıvıdır. Gerçekleştirilen piroliz çalışmalarında üretilen pirolitik yağın piroliz reaktör düzeneğinde bulunan boru cidarlarında yağın yapışması muhtemeldir. Bu nedenle pirolitik yağın yapışmasını ve üretilen tüm pirolitik yağın alınabilmesi için diklorometan kullanılmaktadır.



**Resim 3.6** Diklorometan.

### 3.3 Pirolitik yağ üretim yöntemleri

Pirolitik yağ üretimi için temin edilen meşe palamudu meyveleri toplandıktan sonra öğütülme işlemine tabi tutulacak düzeyde, bir hafta boyunca 35-40°C sıcaklıktaki güneş gören ortamda kurutulmuştur. Öğütülmeye hazır halde bulunan meşe palamutları ağaçla bağlantısını sağlayan ara saçaklı yuvasından çıkarılarak öğütme makinesine yerleştirilmiştir. Resim 3.7'de teknik özellikleri, 380 V, 3 kW ve 3000 dev/dak AC motorla çalışan öğütme makinesine konulmuş meşe palamutları gösterilmektedir.



**Resim 3.7** Öğütme makinesi.

Pirolitik yağ üretimi çalışmaları Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında bulunan piroliz laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon şartlarının sağlanabilmesi adına öğütülen numunelerin parçacık boyutu için 2 mm, 4 mm ve 6 mm elekler kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler piroliz reaktörüne optimizasyon parametre koşulları gereğince Resim 3.8’de görüldüğü üzere 100 g numune hassas terazide ölçülerek piroliz reaktörüne konulmaktadır.



**Resim 3.8** Numunelerin hassas terazide tartılması.

Öğütülen meşe palamudu numune tanecik boyutlandırılmasında 0-2 mm elekten elenmiş numune Resim 3.9'da görülmektedir.



**Resim 3.9** 0-2 mm elekten elenmiş meşe palamudu.

Öğütülen meşe palamudu numune tanecik boyutlandırılmasında 2-4 mm elekten elenmiş numune Resim 3.10'da görülmektedir.



**Resim 3.10** 2-4 mm elekten elenmiş meşe palamudu.

Öğütülen meşe palamudu numune tanecik boyutlandırılmasında 4-6 mm elekten elenmiş numune Resim 3.11'de görülmektedir.



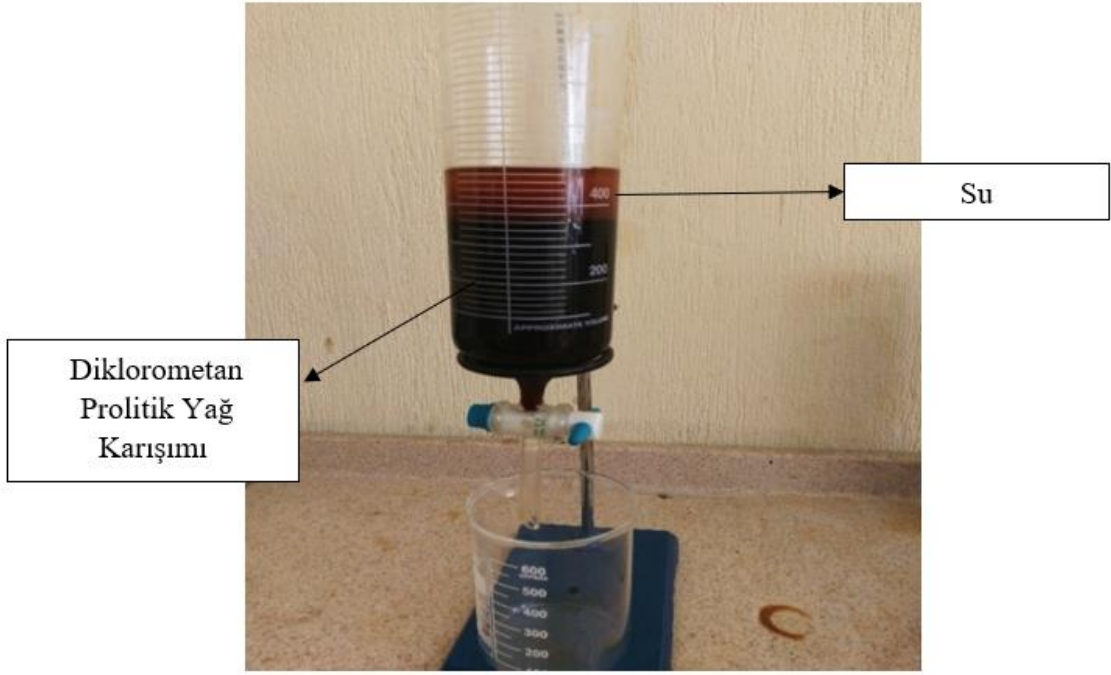
**Resim 3.11** 4-6 mm elekten elenmiş meşe palamudu.

Optimizasyon sağlamak adına bu üç tanecik boyutuna ayrılmış numuneler piroliz reaktörüne alınarak işleme tabi tutulmuştur. Çalışma sonuçlarına bakıldığında en verimli sonuç 0-2 mm tanecik boyutunda alınmıştır. Parçacık boyutu optimizasyonu sonrası sıcaklık değerleri için optimum parametrenin bulunması için 0-2 mm'lik numuneler 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklıklarda pirolitik yağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen kömür (katı), su (sıvı), gaz ve yakıtın kütle oran verileri analiz kağıtlarına not edilmiştir. Piroliz çalışması bitiminde yanmadan arta kalan katı miktarı, evaporatörden damıtılan pirolitik yağ, ayırma hunisi vasıtasıyla heterojen (diklorometan, pirolitik yağ ve su) karışımdan ayrılan su miktarı ve son olarak gaz miktarları belirlenmiştir. Belirtilen sıcaklıklar içerisinde optimum üretim miktarı 500 °C sıcaklıkta ölçülmüştür. Tanecik boyutu ve sıcaklık parametrelerinin ardından üçüncü parametre olarak itici azot gazının akış hızının belirlenmesi için uygulanmıştır. İtici azot gazının akış hızı için: 0,5 L/dak, 1 L/dak ve 1,5 L/dak değerleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek yağ üretiminin 1 L/dak'da alındığı sonucuna ulaşılmıştır. Ardından son parametre olan ısı artış hızının belirlenmesi için pirolitik yağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan parametre değerleri, 5 °C/dak, 10 °C/dak ve 15 °C/dak'dır. Üretim sonucunda optimum sonuç değeri 10 °C/dak'da alınmıştır. Tüm pirolitik yağ üretim çalışmalarında, piroliz reaktör sıcaklığının maksimum sıcaklığında alıkonma süresi 30 dakika uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar bu şartlar altında not edilmiştir.



**Resim 3.12** Piroliz sonrası elde edilen kömür.

Üretim sonunda elde edilen kömür Resim 3.12’de gösterilmektedir. Piroliz işlemi sonlandığında makine kapatılır ve reaktör sıcaklık değeri düşmesi için bir miktar beklendikten sonra reaktör haznesi gerekli cıvataların sökülmesi ile açılır. Daha sonra sıcak halde bulunan reaktör soğuması için serin bir yerde bekletilmeye alınır. Reaktör soğumaya bırakılırken aynı zamanda sistem içerisindeki borularda kalan pirolitik yağlar sağlıklı bir biçimde alınabilmesi adına çözücü madde olarak diklorometan basınçlı bir kap sayesinde kılcal borulara sıkılır. Bu işlem sonrasında süzme tapası açılarak elde edilen pirolitik yağ çözücü diklorometan ile birlikte çıkış haznesinden uygun behere alınır. Çelik yoğuşturucu hazne içerisinde bulunan su ve pirolitik yağ da alınarak tüm karışım heterojen bir halde ayırma hunisine boşaltılarak ayırma işlemine hazır hale getirilir. Ayırma hunisinde bulunan su, pirolitik yağ ve diklorometan karışımı Resim 3.13’te gösterilmektedir.



**Resim 3.13** Pirolitik yağ ve su karışımının ayırıştırma işlemi.

Elde edilen ürünler ayırma hunisine boşaltıldıktan sonra bir süre beklenir ve diklorometan pirolitik yağ karışımının dibine çökmesi gerçekleşir. Daha sonra açma kapama vanası açılarak sadece huni içerisinde su kalana kadar akıtma işlemi devam ettirilir. Kap içerisinde alınan diklorometan ve pirolitik yağ karışımı içerisinde karışan istenmeyen partiküllerden süzülmesi için filtrasyon işlemine tabi tutulur. Filtreleme işlemi Resim 3.14'te görülmektedir. Sonrasında sıvı fazın içerisinde bulunan partiküllerden arındırılan pirolitik yağ ve diklorometan karışımı içerisinde bulunan çözücü diklorometandan ayrıştırılmak üzere evaporatöre alınır.



**Resim 3.14** Karışımın filtreleme işlemi.

Evaporatöre alınan; karışım sıcaklığı 50 °C olan su haznesine karışım balon joje içerisinde daldırılır. Su içerisinde balon jojenin yüksekliği istenilen konuma ayar tuşları vasıtasıyla getirilir. Bu safhada uygun yüzdürme yüksekliği yarısı su içerisinde yarısı dışarıda olacak konumdur. Evaporatör çalışma şartları gereği 50 °C su sıcaklığı ve yaklaşık 280 dev/dak hızında karışım 30 dakika boyunca ayrıştırılmaya bırakılır. Kompresör basınç değerleri 200 psi- 400 psi olacak şekilde ayarlanır.



**Resim 3.15** Evaporatör ile diklorometan ayrıştırma işlemi.

Evaporatörden, diklorometandan ayrıştırılmış halde alınan pirolitik yağ; toplama haznesinde fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılacak analizlerde kullanılmak üzere muhafaza edilir. Her piroliz çalışması sonunda elde edilen pirolitik yağ Resim 3.16’da gösterilmektedir.



**Resim 3.16** Üretilen toplam pirolitik yağ.

Yapılan çalışmalar sonucunda üretilen pirolitik yağın fiziksel değerlerinin belirlenmesi için birtakım analizler yapılmaktadır.



#### 4. BULGULAR

Optimum verimi bulmak için kullanılan parametrelerden; sıcaklık, gaz akış hızı, tanecik boyutu ve ısıtma hızı değerleri ile optimizasyon yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda 500 °C sıcaklıkta, 0-2 mm tanecik boyutunda, 1 L/dak sürükleyici azot gaz akış hızında, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 30 dakika alıkoyma süresinde optimum verim elde edilmiştir. Bu doğrultuda, meşe palamudu pirolitik yağ üretim optimizasyon çalışmasının planlaması Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Optimizasyon çalışma planı.

Çalışma no	Sıcaklık °C	Gaz Akış Hızı L/dak	Parçacık Boyutu mm	Piroliz Alıkonma Süresi dak.	Isıtma Hızı °C/dak
1	400	<b>0,5</b>	0-2	30	10
2	400	<b>1</b>	0-2	30	10
3	400	<b>1,5</b>	0-2	30	10
4	400	1	<b>0-2</b>	30	10
5	400	1	<b>2-4</b>	30	10
6	400	1	<b>4-6</b>	30	10
7	<b>400</b>	1	0-2	30	10
8	<b>450</b>	1	0-2	30	10
9	<b>500</b>	1	0-2	30	10
10	500	1	0-2	30	<b>5</b>
11	500	1	0-2	30	<b>10</b>
12	500	1	0-2	30	<b>15</b>

##### 4.1 Sürükleyici gaz akış hızının ürün oranına etkisi

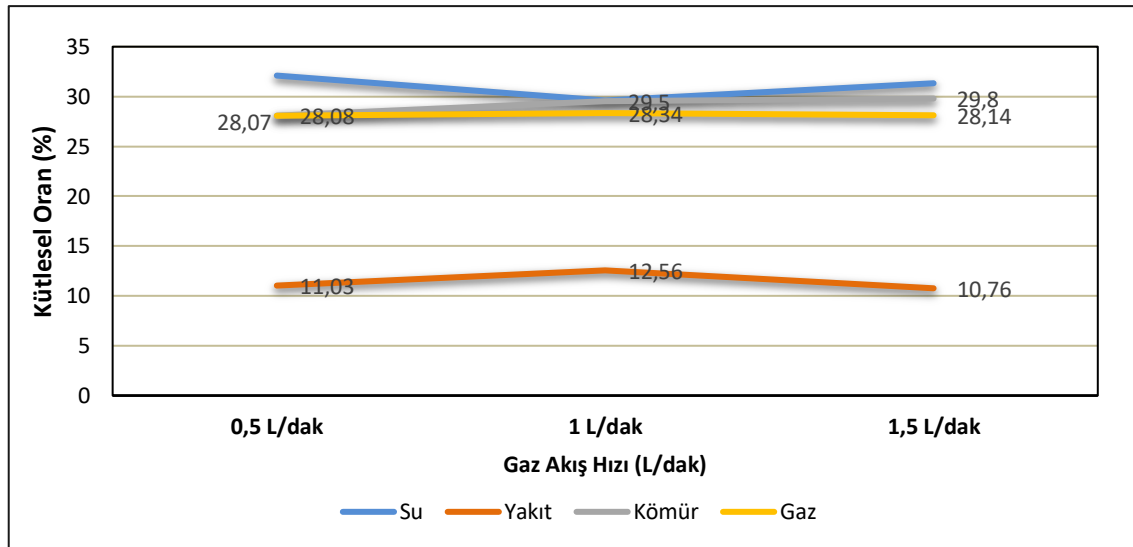
Optimum gaz akış hızının bulunmasında çalışmalar 400 °C sıcaklıkta, 0-2 mm tanecik boyutunda, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 30 dakika alıkonma süresinde tekrarlanmıştır. Aynı değerler kullanılarak gaz akış hızı 0,5 L/dak, 1 L/dak ve 1,5 L/dak değerleri baz alınarak üretim yapılmıştır. Pirolitik yağ üretim sonuçları Çizelge 4.2’de görülmektedir.

**Çizelge 4.2** 400°C’de gaz akış hızına bağlı oluşan ürünlerin oranı.

Sıcaklık (°C)	Oluşan Ürünler (%)	Gaz Akış Hızı (L/dak)		
		0,5 L/dak	1 L/dak	1,5 L/dak
400 °C	Kömür	28,08	29,5	29,8
400 °C	Su	32,1	29,6	31,3
400 °C	Gaz <sup>x</sup>	28,07	28,34	28,14
400 °C	Yakıt	11,03	12,56	10,76

x Aradaki fark oranıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2’e bakıldığında gaz akış hızı 0,5 L/dak değerinden 1,5 L/dak değerine çıktıkça oluşan kömür oranının arttığı gözlemlenmiştir. Optimum verim eldesi 1 L/dak değerinde alınmış olup % 12,56’lık bir pirolitik yağ üretimi yapılmıştır.



**Şekil 4.1** Sürükleyici gaz akış hızının ürünlerin kütle oranına etkisi.

Şekil 4.1’deki grafiğe bakıldığında gaz akış hızlarının değişimleri ile optimum sonucun %12,56 verim oranıyla 1 L/dak gaz akış hızı olduğu görülmektedir. Eğriler incelendiğinde; kömür verimi gaz akış hızı ile doğru orantılı bir şekilde artmıştır. Ancak su oranı 0,5 L/dak’da yüksek iken optimum koşul olan 1 L/dak değerinde düşmekte ve 1,5 L/dak değerinde tekrar yükselmektedir. Optimum koşullarda pirolitik yağ oranının dışında kömür oranı %29,5, su oranı %29,6 ve gaz oranı %28,34 değerlerinde bulunmuştur.

## 4.2 Tanecik boyutunun ürün oranına etkisi

Tanecik boyutu belirleme aşamasında, sıcaklık değeri 400 °C, ısıtma hızı 10°C/dak ve alıkonma süresi 30 dakika alınarak üretim gerçekleştirilmiştir. Gaz akış hızı parametresi optimum koşul olan 10 L/dak değeri alınmıştır. Eleme işlemlerinde 3 farklı boyutlarda elenen meşe palamudu 0-2 mm, 2-4 mm ve 4-6 mm parçacıklarında çalışma yapılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

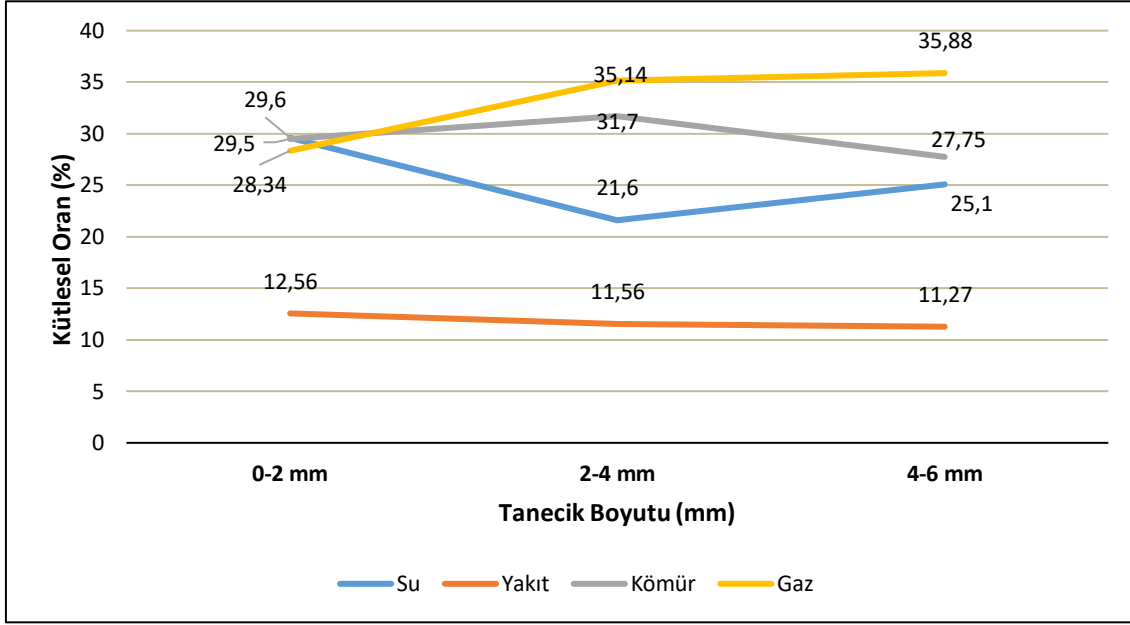
**Çizelge 4.3** 400 °C'de parçacık boyutuna bağlı oluşan ürünlerinin oranı.

Sıcaklık (°C)	Oluşan Ürünler (%)	Parçacık Boyutu (mm)		
		0-2 mm	2-4 mm	4-6 mm
400 °C	Kömür	29,5	31,7	27,75
400 °C	Su	29,6	21,6	25,1
400 °C	Gaz <sup>x</sup>	28,34	35,14	38,88
400 °C	Yakıt	12,56	11,56	11,27

x Aradaki fark oranıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3'te 400 °C'de, 1 L/dak azot gazı akış hızında, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 30 dakika alıkonma süresinde üretilen pirolitik yağ üretimi çalışmasında parçacık boyutu parametresinin optimum değeri 0-2 mm olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.3'e bakıldığında tanecik boyutu arttıkça oluşan gaz miktarında doğrusal bir artış görülmüştür. Tanecik boyutu 0-2 mm'den 2-4 mm tanecik boyutuna arttırıldığında su oranında önemli oranda düşüş gözlemlenmiştir. Tanecik boyutu tekrar arttırıldığında ise %16 artış göstermiştir.

Şekil 4.2'de bulunan grafiğe bakıldığında tanecik boyutu ne kadar küçültülürse o kadar verime etkisi olur. Grafikte de görüldüğü üzere tanecik boyutu arttıkça oluşan gaz miktarında artış görülmektedir. Tanecik boyutu optimizasyonu, 0-2 mm değerinde 400 °C sıcaklıkta, 1 L/dak azot gazı akış hızında, 10 °C/dak ısıtma hızında ve 30 dakika alıkonma süresinde yapılan çalışmada belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kütlece %12,56 pirolitik yağ üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kömürün kütlese oranı %29,5, gazın kütlese oranı %28,34 ve suyun kütlese oranı %29,6 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.2 Tanecik boyutunun ürünlerin kütle oranına etkisi.

### 4.3 Sıcaklığın ürün oranına etkisi

Çalışmalar neticesinde üretilen pirolitik yağ miktarının maksimum olması için 1 L/dak gaz akış hızı, 0-2 mm tanecik boyutu ve 30 dakika alıkoyma süresi belirlenmiştir. Bu aşamaya kadar sıcaklık sabit tutulup diğer parametrelerin optimum verim koşulları bulunmaktaydı şimdi ise 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklıklarında üretimler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.4'te sıcaklık değişiminin oranlara olan etkisi görülmektedir.

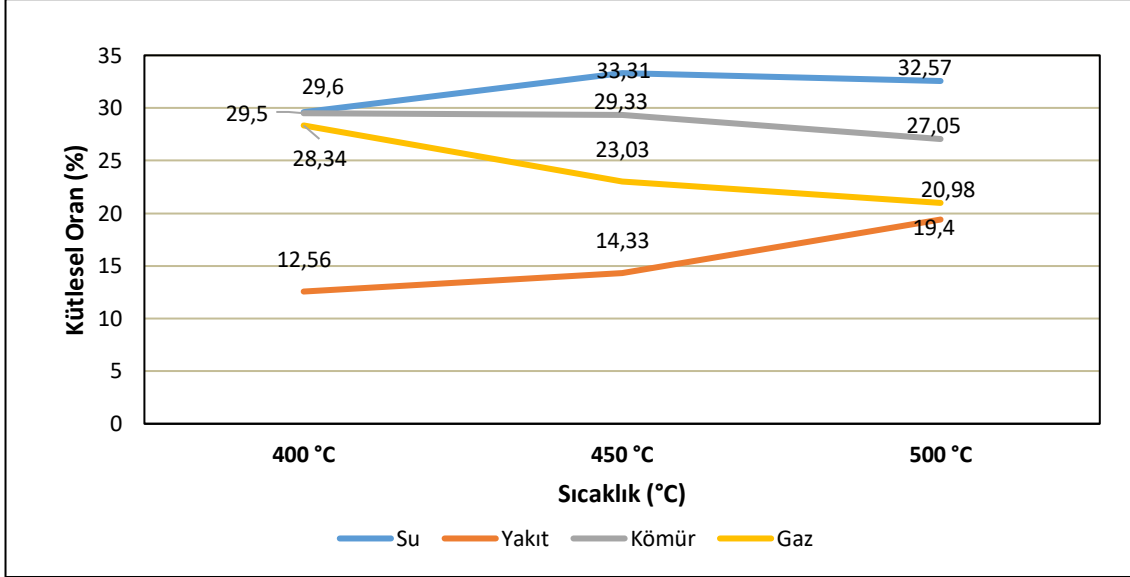
Çizelge 4.4 Sıcaklığa bağlı oluşan ürünlerin oranı.

Sıcaklık (°C)	Kömür (%)	Yakıt (%)	Su (%)	Gaz <sup>x</sup> (%)
400°C	29,50	12,56	29,60	28,34
450°C	29,33	14,33	33,31	23,03
500°C	27,05	19,40	32,57	20,98

x Aralarında oluşan fark ile hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde çizelge 4.4'te de görüldüğü gibi sıcaklık değeri arttıkça üretilen pirolitik yağ miktarında artış gözlemlenmektedir. Çalışmalarda sıcaklık miktarı

artışına bağlı olarak 400 °C'den 450 °C'ye artışta su oranında artış gaz oranında düşüş görülmektedir. Sıcaklık miktarı 450 °C'den 500 °C'ye artışında ise hem su oranı hem de gaz oranı düşmüştür.



Şekil 4.3 Sıcaklık farklarında oluşan ürünlerin kütleli orana etkisi.

Şekil 4.3'te görülen grafiğe bakıldığında verim değerinin en çok etkilendiği parametrenin sıcaklık olduğu görülmektedir. Çalışmalarda 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklık değerlerinde uygulanmıştır. Pirolitik yağ veriminin optimum olduğu şartlar: 500 °C sıcaklıkta, 0-2mm tanecik boyutunda, 1 L/dak sürükleyici gaz akış hızında, 10 °C/dak sabit ısıtma hızında ve 30 dakika alıkoyma süresinde üretilen pirolitik yağ verimi küttelece %19,40 olarak bulunmuştur.

#### 4.4 Isıtma hızının ürün oranına etkisi

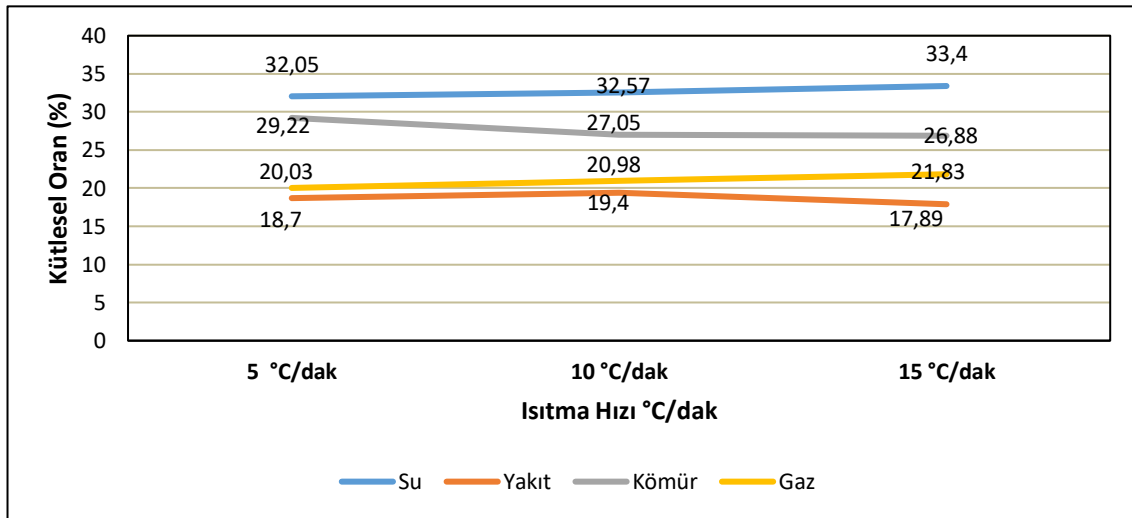
Pirolitik yağ üretim optimizasyon parametrelerinden sonuncusu ısıtma hızıdır. Çalışmalarda; 5 °C/dak, 10 °C/dak ve 15 °C/dak olmak üzere üç farklı ısıtma hızı kullanılmıştır. Üretilen pirolitik yağ oranının en yüksek olması için çalışmalarda 500 °C sıcaklık, 0-2 mm tanecik boyutu, 1 °C/dak ısıtma hızı ve 30 dakika alıkoyma süresi değerleri esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4.5** Isıtma hızına bağlı oluşan ürünlerin oranı.

Sıcaklık (°C)	Oluşan Ürünler (%)	Isıtma Hızı (°C /dak)		
		5 °C/dak	10 °C/dak	15 °C/dak
500 °C	Kömür	29,22	27,05	26,88
500 °C	Su	32,05	32,57	33,40
500 °C	Gaz <sup>x</sup>	20,03	20,98	21,83
500 °C	Yakıt	18,70	19,40	17,89

x Aralarında oluşan fark ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere yapılan çalışmalar neticesinde ısıtma hızı arttıkça kömür oranı düşmektedir. Bunun aksine su ve gaz oranlarında ısıtma hızı arttıkça artış gözlemlenmektedir. Yapılan çalışmalarda optimum değerler olan sıcaklık 500 °C, tanecik boyutu 0-2 mm, azot akış hızı 1 L/dak ve 30 dakika alıkoyma süresi referans alınmıştır.



**Şekil 4.4** Isıtma hızından oluşan farkların kütleli orana etkisi.

Farklı ısıtma hızının etkisi Şekil 4.4'te görülmektedir. Görülen grafikte ısıtma hızının 10 °C/dak olduğu değerinde optimum koşullar gerçekleşmiştir. Son parametrenin de belirlenmesiyle pirolitik yağ üretiminin optimizasyon koşulları; 500 °C sıcaklıkta, 0-2 mm tanecik boyutunda, 10 °C/dak ısıtma hızında 1 L/dak azot gazı akış hızında ve 30 dakika alıkoyma süresinde gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda üretilen pirolitik yağ oranının kütlece %19,40 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra optimum koşulda, kömür oranı %27,05, su oranı %32,57 ve gaz oranı %20,98 olarak bulunmuştur.

#### 4.5 Pirolitik yağın özellikleri

Yapılan çalışmalar sonucunda üretilen pirolitik yağın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Fiziksel özelliklerin tayin edilebilmesi için Afyon Kocatepe Üniversitesi; Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM) ve Standard Laboratuvarlar İşletmeciliği A.Ş.'de analizler yapılmıştır. Üretilen pirolitik yağın analiz özellikleri ve dizelle değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.6'da görülmektedir.

**Çizelge 4.6** Pirolitik meşe palamudu yağının analiz özellikleri ve dizelle karşılaştırılması.

<b>Analiz</b>	<b>Birim</b>	<b>Analiz Raporu</b>	<b>Dizel</b>	<b>Analiz Metodu</b>
Kin. Viskozite (40 °C)	(mm <sup>2</sup> /s)	9,20	1,5-4	TS 1451 EN SO 3104
Su	(mg/kg)	2,72	<200	TS 6147 EN ISO 12937
Yoğunluk	(g/cm <sup>3</sup> )	1,089	0,82-0,845	PN EN ISO 3675
Kükürt	(ppm)	0,47	<0,01	TS 440 ISO 351

Analiz değerleri incelendiğinde, pirolitik yağın 40 °C için kinematik viskozite, yoğunluk ve kükürt değerlerinin dizelle kıyasla yüksek miktarda, su miktarının ise standart değer aralığında olduğu görülmektedir.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada literatürden farklı olarak Anadolu meşe ağacının meyvesi olan meşe palamudu biyokütle kaynağı olarak seçilmiştir. Sabit yataklı piroliz reaktöründe yapılan üretimde 4 farklı parametre optimizasyonu yapılmıştır. Parametreler; sıcaklık, sürükleyici azot gazı akış hızı, tanecik boyutu ve ısıtma hızıdır.

Bu parametrelerle yapılan optimizasyon çalışmasında en uygun pirolitik yağ üretimi koşulları, 500 °C sıcaklık, 1 L/dak sürükleyici azot gazı akış hızı, 0-2 mm tanecik boyutu, 10 °C/dak ısıtma hızı ve 30 dakika sabit alıkoyma süresi olarak belirlenmiştir. Bu optimizasyon şartlarında üretilen pirolitik yağ miktarının kütle oranı %19,40, su oranı %32,57, kömür oranı %27,05 ve gaz oranı %20,98 olarak belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalarda, 400 °C sıcaklıkta, 1,5 L/dak sürükleyici azot gazı akış hızında, 4-6 mm tanecik boyutunda, 15 °C/dak ısıtma hızında ve 30 dakika sabit alıkoyma süresinde en düşük pirolitik yağ üretimi yapılmış ve üretilen pirolitik yağ oranı %9,26 olarak belirlenmiştir.

Üretilen pirolitik yağın araçlarda kullanılabilirliği için fiziksel analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda üretilen pirolitik yağın fiziksel değerlerinden yoğunluk ve 40 °C için kinematik viskozitenin yüksek olması motor performansını olumsuz etkiler. Ancak 40 °C için kinematik viskozite ve yoğunluktaki yüksek değerler, pirolitik yağın belirli oranlarda dizel yakıtı ile karıştırılmasıyla standart değerlere indirgenebilir ve dizel yakıtlı içten yanmalı motorlarda kullanılabilir.

Bu çalışmanın detaylandırılması için tanecik boyutu daha sık aralıklarla olursa elde edilen sonuçların optimizasyon açısından daha verimli olacağı düşünülmektedir. Yine ısıtma hızı koşullarının da 20 °C/dak gibi daha yukarı ya da 7 °C/dak gibi ara değerlerle üretim yapılabilirse optimizasyon açısından daha verimli olacağı düşünülmektedir.



## 6. KAYNAKLAR

- Abdeshahian P, Lim J H, Ho S W, Hashim H, Lee C T, 2016, Potential of Biogas Production from Farm Animal Waste in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 714–723.
- Achinas S, Achinas V, Euverink G J W, 2017, A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste, *Engineering*, 3, 299-307.
- Açık M, 2019, Turunçgiller Atıklarından Piroliz Yöntemi ile Pirolitik Yağ Üretiminin Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 50s, Afyonkarahisar.
- Akan G, 2013, Biyokütleden Basınçlı Piroliz Yöntemiyle Elde Edilen Ürünlerin Cevap Yüzey Metodu Kullanılarak Optimizasyonu ve Karakterizasyonu, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi 118s, Eskişehir.
- Akbulut F, 2018, Fındık Kabuğundan Pirolitik Yakıt Üretiminin Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Afyonkarahisar.
- Anonim, 2014, Biyokütlenin Altın Çağı, Deloitte, İstanbul.
- Ar F F, 2018, Ottan Çöpten Enerji, *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, 143, 24-27.
- Aslantaş A, 2018, Dünyada ve Türkiye’de Biyokütle Enerjisinin Kullanımı ve Potansiyeli, KTO Karatay Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, Konya.
- Aydın F F, 2010, Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 35, 317-340.
- Bhattacharya S C, 2011, *Energy Economics*, Springer, 721p, London.
- Bilginoğlu M A, 1991, Gelişmekte Olan Ülkelerde Enerji Sorunu ve Alternatif Enerji Politikaları, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9, 122-147.
- Bridgwater A V, 2003, Renewable Fuels and Chemicals by Thermal Processing of Biomass, *Chemical Engineering Journal*, 91, 87-102.

- Bridgwater A V, Grassi G, 1991, Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation, Elsevier Applied Science, 380p, England.
- Çağlar A, 2004, Çay Atığının Katalitik Pirolizi: Sıvı Ürün Verimi Üzerine Katalizörlerin Etkisi, Kastamonu Eğitim Dergisi, 12, 385-392.
- Çetişli F, 2013, Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Pirolizi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125s, Ankara.
- Doğan O, 2012, Atık Taşıt Lastiğinden Üretilen Pirolitik Yakıtın Bir Dizel Motorda Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 177s, Karabük.
- Durak M, 2021, Yabani Bitkilerden Pirolitik Yağ Üretimi ve Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 50s, Afyonkarahisar.
- Ekpeni L E N, Benyounis K Y, Ekpeni F H, Stokes J, Olabi A G, 2014, Energy Diversity through Renewable Energy Source (RES) – A Case Study of Biomass, Energy Procedia, 61, 1740-1747.
- Erkul H, 2012, Jeotermal Enerjinin Ekonomik Katkıları ve Çevresel Etkileri, Denizli-Kızıldere Jeotermal Örneği, Yönetim Bilimleri Dergisi, 10, 115-133.
- Gençoğlu M T, 2021, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 57-64.
- Isa K M, Daud S, Hamidin N, Ismail K, Saad S A, Kasim F H, 2011, Thermogravimetric Analysis and The Optimisation of Bio-Oil Yield from Fixed-Bed Pyrolysis of Rice Husk Using Response Surface Methodology (RSM), Industrial Crops and Products, 33, 481-487.
- Kan T, Strezov V, Evens J, 2016, Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1126-1140.
- Kapluhan E, 2014, Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu, Marmara Coğrafya Dergisi, 30, 97-125.

- Kar Y, 2018 Catalytic Cracking of Pyrolytic Oil by Using Bentonite Clay for Green Liquid Hydrocarbon Fuels Production, Biomass and Bioenergy, 119, 473-479.
- Karaaslan S, 2019, İşlenmiş Deri Atıklarının Pirolizi ile Biyoyakıt Eldesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, Afyonkarahisar.
- Karakuş N, 2000, Yakıt Özelliklerinin Dizel Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 127s, Ankara.
- Karaosmanoğlu F, 2006, Biyoyakıt Teknolojisi ve İTÜ Araştırmaları, İTÜ Enerji Çalıştay ve Sergisi Bildiriler ve Sunumlar, Çevrimiçi erişim tarihi 18.01.2017, 110-146.
- Kaygusuz Ö, 2020, Hızlı Piroliz Yöntemi ile Orman Atıklarının Pirolizi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 104s, Giresun.
- Kurnuç Seyhan A, Badem A, 2021, Erzincan İli Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Değerlendirilmesine Yönelik Biyogaz Tesisi Senaryoları, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11, 245-256.
- Koç E, Kaya K, 2015, Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu, Mühendis ve Makine, 56, 36-47.
- Namal C, 2018, Organik Atıkların Hızlı Pirolizi ile Biyoyağ Üretilmesi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 55s, Antalya.
- Okumuş Çelik Z, Doğan T H, 2019, Biyodizeldeki Suyun Reçine ile Uzaklaştırılması: Adsorpsiyon İzotermi, Kinetiği ve Termodinamik İncelemesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 561-570.
- Özçiftçi A, Özbay G, 2013, Mobilya Endüstrisi Atıklarından Katalitik Piroliz Yöntemi ile Biyoyakıt Üretimi, Gazi Üniversitesi Müh. ve Mim. Fak. Dergisi, 28, 473-479.
- Öztürk Tophanecioğlu S, 2009, Tarımsal Atıklardan Hızlı Piroliz Yöntemiyle Sentetik Sıvı Yakıt Eldesinde Piroliz Parametrelerinin Etkisi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s, Eskişehir.

- Sezgin İ V, 2021, Biyokütle Hızlı Piroliz Ürünlerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 155s, Antalya.
- Shen J, Wang X, Garcia-Perez M, Mourant D, Rhodes M, Li C, 2009, Effects of Particle Size on The Fast Pyrolysis of Oil Mallee Woody Biomass, Fuel, 88, 1810-1817.
- Sözen E, Gündür G, Aydemir D, Güngör E, 2017, Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 19, 148-160.
- Şengül Ü, Tan S, Atak Ş, Şengül A B, 2014, Türkiye Gökçeada'da Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Potansiyeli, Akademik Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi, 6, 41-55.
- Uslu S, 2019, Atık Lastik Piroliz Yağı-Dizel Karışımları ile Çalışan Bir Dizel Motorda Emisyon ve Performansın Eşzamanlı Tahminine Yönelik Bir Yanıt Yüzeysel Metodolojisinin Geliştirilmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7, 1261-1278.
- Üçgül İ, Elibüyük U, 2017, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Enerji Jeopolitiği, Anka E-Dergi, 2, 1-8.
- Üçgül İ, Selbaş R, 2013, SDÜ Yekarum Temiz Enerji Uygulamaları, Güneş Enerjili Yüzme Havuzu Isıtma Sistemi Uygulamaları, Rapor No: 2013-R04, 50s.
- Wallart N, 1999, The Political Economy of Environmental Taxes: New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar Publishing, 224p, United Kingdom.
- Yazar N, 2019, Piroliz Yöntemi ile Ceviz Kabuğundan Yakıt Üretiminin Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Afyonkarahisar.
- Yıldırım H H, 2019, Yenilenebilir Enerji Yatırımlarındaki Teşviklerin Yatırım Performansları Üzerine Etkisi, Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4, 330-345.

Zakari B C, 2020, Biyokütlenin Hızlı Piroлиз Parametrelerinin Optimizasyonu ve Katalizörün Ürünlere Etkileri, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 178s, Antalya.

### **İnternet Kaynakları**

1-<https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/assets/upload/dosyalar/g-c3-bcne-c5-9f20enerjisi-20sekt-c3-b6rel-20analiz-20raporu.pdf>, 03.01.2022.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emirhan YELEKİN  
Doğum Yeri ve Tarihi : BURSA 09.02.1997  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) : 0543 672 71 57 / yelekinemirhan@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Açık Öğretim Lisesi (2010 – 2014)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği  
(2014– 2019)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Otomotiv Mühendisliği ABD, (2020 – 2022)