



**KESTANE DIŞ KABUĞUNDAN PİROLİZ YÖNTEMİYLE
YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan Burak URHAN

Danışman

Prof. Dr. İbrahim MUTLU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESTANE DIŞ KABUĞUNDAN PİROLİZ YÖNTEMİYLE
YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU

Furkan Burak URHAN

Danışman

Prof. Dr. İbrahim MUTLU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Furkan Burak URHAN tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 06.07.2022 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	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza
Üye	: Ünvanı Adı SOYADI Üniversite adı, Fakültesi	 İmza

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,
- Elde ettiğim yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanmam durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin hepsini kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite ya da başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/07/2022

Furkan Burak URHAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KESTANE DIŞ KABUĞUNDAN PİROLİZ YÖNTEMİYLE YAKIT ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYONU

Furkan Burak URHAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İbrahim MUTLU

Son yıllarda ilerleyen teknolojiyle beraber enerjiye duyulan ihtiyaç artmakta ve bu artan ihtiyacı karşılayabilmek adına alternatif enerji kaynaklarının arayışına ilgi artmaktadır.

Bu çalışmada biyokütle kaynaklarından biri olan kestane dış kabuğu biyoyakıt kaynağı olarak belirlenmiş ve reaktör yardımıyla piroliz işlemi yapılmıştır. Yapılan deneylerde gaz akış hızı, piroliz sıcaklığı ve ısıtma oranının pirolitik yağ verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde en yüksek pirolitik yağ verimine 500 °C piroliz sıcaklığı, 1 L/dk sürükleyici azot gazı akış hızı ve 10 °C/dk ısıtma oranı ve 30 dk alıkonma süresi ile kütlece %16,86 olarak saptanmıştır. Deneyler neticesinde elde edilen pirolitik yağ incelemeler için ilgili laboratuvarlara gönderilmiş ve 40 °C için kinematik viskozite 8,60 mm²/s, yoğunluk 1146,50 kg/m³, su oranı 1,22% ve kükürt oranı 0,32% tespit edilmiştir.

2022, ix + 41 sayfa

Anahtar Kelimeler: Piroliz, Optimizasyon, Kestane Dış Kabuğu, Biyoyakıt

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

OPTIMIZATION OF FUEL PRODUCTION BY PYROLYSIS METHOD FROM CHESTNUT OUTER SHELL

Furkan Burak URHAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. İbrahim MUTLU

In recent years, the need for energy has increased with the advancing technology and the interest in the search for alternative energy sources has increased in order to meet this increasing need.

In this study, the outer shell of chestnut, which is one of the biomass sources, was determined as a biofuel source and pyrolysis was carried out with the help of a reactor. The effects of gas flow rate, pyrolysis temperature and heating rate on pyrolytic oil yield were investigated in the experiments. As a result of the data obtained, the highest pyrolytic oil yield was determined as 16.86% by mass, with a pyrolysis temperature of 500 °C, an entraining nitrogen gas flow rate of 1 L/min, a heating rate of 10 °C/min and a retention time of 30 minutes. The pyrolytic oil obtained as a result of the experiments was sent to the relevant laboratories for examinations and the kinematic viscosity 8,60 mm²/s, density 1146,50 kg/m³, water ratio 1,22% and sulfur ratio 0,32% were determined for 40 °C.

2022, ix + 41 pages

Keywords: Pyrolysis, Optimization, Chestnut Outer Shell, Biofuel

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığım günden bugüne dek her açıdan beni destekleyen kıymetli büyüğüm değerli hocam Prof. Dr. İbrahim MUTLU'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tezin araştırma, uygulama ve yazım süresince katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Emirhan YELEKİN ve Yüksek Mühendis Mehmet DURAK'a; tezin hazırlanması boyunca her türlü desteğini esirgemeyen sevgili eşim Nurdan URHAN'a ve kıymetli aileme teşekkür ederim.

Furkan Burak URHAN

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 Kestane Dış Kabuğu	3
2.2 Literatür Çalışmaları	3
2.3 Enerji ve Enerji Kaynakları	9
2.3.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları	10
2.3.2 Yenilenebilen Enerji Kaynakları.....	11
2.3.2.1 Güneş Enerjisi	11
2.3.2.2 Hidrolik Enerji.....	11
2.3.2.3 Rüzgâr Enerjisi	12
2.3.2.4 Jeotermal Enerji.....	12
2.3.2.5 Biyokütle Enerjisi.....	13
2.4 Piroliz İşlemi.....	14
2.4.1 Pirolizi Etkileyen Faktörler	15
2.4.1.1 Piroliz Sıcaklığının Deneylere Etkisi	15
2.4.1.2 Parçacık Boyutunun Deneylere Etkisi.....	16
2.4.1.3 Isıtma Hızının Etkisi.....	16
2.4.1.4 Sürükleyici Azot Gazı Akış Hızının Deneylere Etkisi.....	16
2.5 Pirolitik Yağ Özellikleri.....	17
2.5.1 Viskozite	17
2.5.2 Yoğunluk.....	17
2.5.3 Setan Sayısı	18
2.5.4 Su İçeriği	18
2.5.5 Kükürt İçeriği.....	19

3. MATERYAL METOT	20
3.1 İş Akış Şeması	20
3.2 Deneylerin Çalışma Düzeni ve Ekipmanlar.....	20
3.2.1 Kestane Dış Kabuğu.....	21
3.2.2 Piroliz Cihazı.....	22
3.2.3 Hassas Terazî	22
3.2.4 Ayırma Hunisi.....	23
3.2.5 Evaporatör Cihazı.....	24
3.2.6 Diklorometan Maddesi.....	24
3.3 Pirolitik Yağın Elde Edilmesi Yöntemi	25
4. BULGULAR	30
4.1 Sürükleyici Azot Gazı Akış Hızındaki Değişimin Ürün Oranına Etkisi	31
4.2 Sıcaklık Değerindeki Değişimin Ürün Oranına Etkisi	32
4.3 Isıtma Hızındaki Değişimin Ürün Oranına Etkisi.....	33
4.4 Elde Edilen Pirolitik Yağın Özellikleri.....	35
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	36
6. KAYNAKLAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ.....	41

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CO ₂	Karbondioksit
N ₂	Nitrojen
NO _x	Nitrojenoksitler
CO	Karbonmonoksit
HC	Hidrokarbon
O ₂	Oksijen
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

EJ	Eksa joule
DK	Dakika
L	Litre
ML	Milimetre
MÖ	Milattan Önce
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol
RPM	Dakikadaki devir sayısı
RSM	Cevap yüzeyi metodu
TUAM	Teknoloji uygulama ve araştırma merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yenilenebilen enerji kaynağı çeşitleri.....	11
Şekil 2.2 Biyokütle madde kaynaklarının sınıflandırılması	13
Şekil 3.1 İş akış şeması	20
Şekil 4.1 Sürükleyici gazın akış hızının ürünlerin kütleli oranına etkisi	31
Şekil 4.2 Sıcaklık farklarında meydana gelen ürünlerin kütleli orana etkisi	33
Şekil 4.3 Isıtma hızındaki farklılıklara göre meydana gelen ürünlerin kütleli orana etkisi	34



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1 Optimizasyon deney planı.....	31
Çizelge 4.2 400 °C’de gaz akış hızına bağlı meydana gelen ürünlerin oranı.....	32
Çizelge 4.3 Sıcaklığa bağlı meydana gelen ürünlerin oranı	33
Çizelge 4.4 Isıtma hızındaki farklılıklarına göre meydana gelen ürünlerin oranı.....	34
Çizelge 4.5 Pirolitik yağın analiz raporu ve dizelle karşılaştırılması.....	35



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Kestane dış kabuğunun yaş hali	21
Resim 3.2 Piroliz cihazı	22
Resim 3.3 Hassas terazi.....	23
Resim 3.4 Ayırma hunisi	23
Resim 3.5 Evaporatör cihazı	24
Resim 3.6 Diklorometan maddesi	24
Resim 3.7 Öğütme makinesi ve içerisinde bulunan kestane dış kabukları	25
Resim 3.8 Numunelerin hassas terazide tartılması işlemi.....	26
Resim 3.9 Piroliz sonrasında meydana gelen kömür	27
Resim 3.10 Pirolitik yağ ile suyun ayırıştırma işlemi	28
Resim 3.11 Karışımın filtrelenmesi işlemi.....	28
Resim 3.12 Diklorometanın ayırıştırma işlemi	29

1. GİRİŞ

Enerji, insanlık tarihinin gelişimi süresi zarfında hayatta kalabilmek ve hayatının devamını sağlayabilmek amacıyla oldukça fazla öneme sahip bir faktördür. Enerji kaynağı denildiğinde akla gelen ilk kaynak fosil yakıtlardır. Süratle artış eğilimi gösteren küresel dünya nüfusu ile benzer oranda süregelen çok yüksek seviyelerde enerji kullanımı neticesinde yenilenemeyen bir çeşit enerji kaynağı olarak tanımlanan fosil yakıtların ham madde rezerv oranlarında ciddi bir azalmaya neden olmuştur (Koç 2019).

Dünyanın talep ettiği enerjinin kütlege %77'si yenilenemeyen enerji kaynağı çeşitlerinden olan kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlar tarafından sağlanmaktadır. Sanayisi gelişmiş ülkelerin tüketim verilerinin oldukça yüksek olması ile tanımlanan petrol rezervleri arasında değerlendirme yapıldığı zaman 2050 senesine yetecek kadar petrol rezervinin kalabileceği tahmini ileri sürülmektedir (Yaşar 2018).

Biyokütle esas olarak hidrojen, karbon ve oksijenden meydana gelen, yaşamakta olan ya da yakın geçmişte var olmuş organik maddelerdir ve moleküler bağlarında saklanabilen güneş enerjisine sahiptir. Biyokütle fosil yakıtlara alternatif olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu yüzden geleceğin en önemli enerji kaynaklarından biri olarak gösterilmektedir. Biyokütle çevre açısından temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Fosil yakıtların oluşumu milyonlarca sene sürerken; bitkilerin kısa süre içerisinde büyümeye yatkın olmaları biyokütlenin daha kısa sürede oluşumunu sağlamaktadır (Namal 2018).

Piroliz işlemi oksijensiz ortamda biyokütlenin yakılması neticesinde meydana gelen biyoyağ (katran), su, kömür ve gaz benzeri maddelerden oluşan termokimyasal dönüşüm prosesidir. Piroliz, biyokütle kullanarak alternatif yakıt üretmenin en verimli yöntemlerinden biridir. Piroliz işlemindeki önemli parametreler; sıcaklık, sürükleyici gaz akış hızı, ısıtma hızı ve alıkonma süresidir. Bu parametrelere ek olarak biyokütlenin parçacık boyutu da önemli bir yere sahiptir (Ayyıldız 2014).

Pirolitik yakıtlar, dizel motorlarda az bir değişimle veya hiç değişime gerek kalmadan kullanılabilir. Pirolitik yakıtların yakıt özellikleri dizel yakıtın yakıt özelliklerine benzerdir. Pirolitik yakıtların yakıt özellikleri bakımından üstünlükleri; daha iyi yağlama, oldukça düşük seviyede kükürt oranı ve aromatik içerik, oldukça yüksek oksijen içeriği, daha yüksek setan sayısı ve parlama noktasıdır. Bunlara ek olarak, pirolitik yakıtlar için olumsuz yönleri ise şöyle sıralanabilir: Daha yüksek maliyet, yüksek viskozite, daha düşük ısıtma değeri, daha yüksek akma noktasıdır (Akbulut 2018).

Bu tez çalışmasında kestane dış kabuğundan sabit yataklı bir piroliz reaktöründe pirolitik yakıt üretiminin optimizasyon işlemi yapılmıştır. Pirolitik yağ üretiminde kullanılan parametreler; sürükleyici gaz akış hızı, sıcaklık, ısıtma hızı ve alıkonma süresidir. Üretim sonucu elde edilen pirolitik yağ laboratuvar ortamında testlere tabi tutulmuş olup; 40 °C sıcaklık değeri için kinematik viskozite tayini, yoğunluk, su ve kükürt oranı tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kestane Dış Kabuğu

Kestane ağaçları dikenli ağaç grubunda yer almaktadır. Yapraklarının kenarları testere dişli ve biraz serttir. Kestane ağaçları çoğunlukla kumlu topraklarda ve kayalık yamaçlarda yetişir. Kestane ağacı kireçli toprakları sevmemektedir. Bursa ilinde yetişen kestaneler oldukça üne sahiptir. Yabani olarak yetişen kestaneler olduğu gibi yemiş olarak tüketilen kestane çeşitleri de bulunmaktadır. Yabani olarak yetiştirilen kestanelerin boyları 20-30 metre arasında değişmektedir. Kestane ağaçlarının ömürleri en fazla 650-700 yıl kadardır. Çoğunlukla 5-6 metre yüksekliğe sahiptir.

2.2 Literatür Çalışmaları

Durak, incelediği araştırmada; yabani bitkilerden bir tür olarak sınıflandırılan sığırkuyruğu (*verbascum*) otundan piroliz tekniğiyle pirolitik yağ üretiminde bulunmuştur. Yaptığı deneyler sonucunda optimum değerleri tespit edebilmek amacıyla 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C üretim sıcaklık değerlerinde, 0,5 l/dk, 1 l/dk ve 1,5 l/dk sürükleyici azot (N₂) gazı akış hızında ve 5 °C/dk, 10 °C/dk ve 15 °C/dk ısıtma hızında en yoğun hale getirmek için uygulamalarda bulunmuştur. Yaptığı deneyler sonucunda üretim değerlerinin en verimli parametrelerinin 10 °C/dk ısıtma hızı, 0,5 l/dk itici azot (N₂) gazı akış hızı ve 500 °C sıcaklık olduğunu saptamıştır. Elde ettiği pirolitik yağın özelliklerinin analiz sonuçları ise: yoğunluğu 1,1358 g/cm³, 40 °C'deki kinematik viskozitesi 2,60 mm²/s, su oranı ağırlıkça %3 ve kükürt oranı ağırlıkça %0,17 olarak bulunmuştur (Durak 2021).

Akbulut, yapmış olduğu deneylerde; fındık kabuğunu biokütle kaynak olarak kullanmış ve sabit yataklı piroliz reaktöründe piroliz işlemini gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu deneyler sonucunda piroliz ürünlerinin verimliliği üzerine pirinç kabuğunun eklenmesi ve sıcaklık gibi değişkenlerin etkisini araştırmıştır. Yapmış olduğu deneyleri 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C sıcaklık değerlerinde, 10 °C/dk ısıtma hızında ve 1 l/dk akış hızında itici azot gazı (N₂) kullanmak suretiyle gerçekleştirmiştir.

Belirlediği en uygun koşullar altında sıcaklıkta %5, %10, %15, %20 pirinç kabuğu ekleyerek kömür, su, yağ ve buhar ürünlerinin verimliliklerindeki değişiklikleri araştırmıştır. İlave edilen %15 pirinç kabuğu verimlilik açısından F10 yakıtına göre %85,09 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Dizel yakıtla kıyaslandığında ise motor gücü ve momentinde azalış görüldüğü, özgül yakıt tüketimindeyse artış görüldüğü tespit edilmiştir (Akbulut 2018).

Yelekin, yapmış olduğu deneylerde, biyokütle kaynağı olarak seçtiği meşe palamudunu biyoyakıt üretimi sağlayabilmek için enerji kaynağına alternatif olarak kullanılmış ve pirolitik yağın üretimini gerçekleştirmiştir. Ürünleri dört farklı parametre değerleriyle optimize etmiştir. Bu parametre değerleri; itici N₂ gazının akış hızı, sıcaklık değeri, tanecik boyutu kısıtı ve ısıtma hızıdır. Yapmış olduğu deneyler sonucunda optimum üretim koşullarını; 500 °C sıcaklık, 1 l/dk itici azot gazının akış hızı, 0-2 mm tanecik boyutu, 10 °C/dk ısıtma hızı ve 30 dk sabit olacak bir alıkonma süresi şeklinde belirlemiştir. Belirlediği optimum üretim koşullarında üretilen yağın miktarı kütsel olarak en yüksek %19,40 değerinde tespit etmiştir. Üretilen pirolitik yağın fiziksel özelliklerine bakıldığında yoğunluğun 1,089 g/cm³, 40 °C sıcaklık değeri için kinematik viskozite 9,20 mm²/s, su oranını 2,72 mg/kg ve kükürt oranını 0,47 ppm olmak üzere tespit edilmiştir (Yelekin 2022).

Yazar, incelemiş olduğu deneylerde ceviz kabuğu kullanarak piroliz yöntemi ile pirolitik yağ üretimini gerçekleştirmiştir. Deneylerinde pirolitik yağın üretilmesi için; sıcaklık değerinin, ısıtma hızının ve sürükleyici azot gazı akış hızının üretime etkisini inceleyerek optimizasyon çalışmalarını yürütmüştür. Deneylerinde ısıtma hızı değerini 10 °C/dk, sıcaklığı 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C sıcaklık değerlerinde; sürükleyici azot gazının akış hızını ise 0,5 l/dk, 1 l/dk, 1,5 l/dk koşullarında tamamlamıştır. Elde edilen pirolitik yağın optimizasyon sonucunda en düşük verime sahip sıcaklık değerinin 550 °C olduğunu ve 1,5 l/dk sürükleyici gaz akış hızında olduğunu gözlemlerken, en verimli üretim parametrelerinin 500 °C sıcaklık değerinde ve 0,5 l/dk sürükleyici azot gazının akış hızında olduğunu saptamıştır (Yazar 2019).

Açık, yapmış olduğu deneylerde; turunç çekirdeği kullanarak piroliz tekniğiyle pirolitik yağ üretimi yapmıştır. Pirolitik yağın elde edilmesinin optimizasyonu sağlamak için birtakım çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalar neticesinde sürükleyici gaz akış hızını, üretim sıcaklık değerini ve ısıtma hızını değiştirmek suretiyle sıvı, gaz ve katı olacak şekilde üç ayrı fazda ürün üretmiştir. Turunç çekirdeğinden ürettiği pirolitik yağın optimum parametrelerinden; sıcaklık değerini 550 °C, ısıtma hızını 5 °C/dk ve sürükleyici gazının akış hızını 0,5 l/dk şeklinde saptamıştır. Uygun değerleri sağlama işlemine ek olarak, ürettiği pirolitik yağın fiziksel özelliklerini saptamak amacıyla belirli analizlere gönderilmiş ve kinematik viskozitesini, yoğunluk miktarını, kükürt oranını ve su oranını saptamıştır (Açık 2019).

Kaygusuz, yapmış olduğu deneylerde ormandan elde ettiği atıklara uyguladığı hızlı piroliz tekniğiyle 1 mm parçacık boyutundaki biyokütle örneklerini bire bir oranında karıştırarak biyokütle karışımı ortaya çıkarmıştır. Üretmiş olduğu biyokütle karışımını, piroliz reaktöründe hızlı piroliz yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Bu biyokütle karışımında uygulamış olduğu hızlı piroliz tekniğinin mamul verimlilikleri hususunda; sıcaklık değeri, ısıtma hızı ve sürükleyici azot gazının akış hızı parametrelerinin etkisini araştırmıştır. Piroliz çalışmalarını 1 mm’de sabit tutulan parçacık boyutunda; 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C ve 750 °C sıcaklık değerlerinde, 100 °C/dk, 250 °C/dk, 400 °C/dk ve 600 °C/dk ısıtma hızı değerlerinde ve 50 cm³/dk 100 cm³/dk, 200 cm³/dk ve 300 cm³/dk akış debilerinde tamamlamıştır. Bu deneyler sonucunda 500 °C piroliz sıcaklığı, 100 °C/dk ısıtma hızı ve 50 cm³/dk azot gazının akış hızında en uygun verim saptanmıştır. Hızlı piroliz işlemi sonucunda üretilen biyoyağın ısı değeri hammaddesiyle karşılaştırdığında %40 artış gösterdiği tespit edilmiş ve 5900 cal/g olarak bulunmuştur (Kaygusuz 2020).

Çetişli, yapmış olduğu deneylerde kullanım ömrü tükenmiş olan lastikleri kullanarak sabit yataklı piroliz reaktöründe katı, sıvı ve gaz fazda olmak üzere ürünler üretmiştir. Deneylerinde iki ayrı türde kullanım ömrü tükenmiş olan lastikleri kullanan Çetişli, ısıtma hızını 5 °C/dk ve 10 °C/dk değerleri doğrultusunda; uygulanan sıcaklık değerlerininse 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C ve 550 °C olacak şekilde optimizasyonunu sağlamıştır.

Gerçekleştirdiği deneylerin çıktısı olarak; bulunan karbon karası ve pirolitik yağ miktarının en uygun üretim koşullarının, 500 °C sıcaklık değerinde ve 10 °C/dk ısıtma hızında olduğunu saptamıştır. Bu bağlamda üretilen pirolitik yağın ısıl değer, elemental analiz, kükürt miktarının belirlenmesi analizini, karbon karası için ise; elemental ve ısıl değer analizini inceleyerek deneylerinde kullandığı malzeme hakkında ayrıntılı bilgilere yer vermiştir (Çetişli 2013).

Akan, yapmış olduğu deneylerde biyokütle kaynağı için sarı kantaronu tercih etmiştir. Deneylerini sabit yataklı piroliz reaktöründe basınçlı piroliz tekniği ile yapmıştır. Piroliz değişkenleri olarak; basınç, sıcaklık ve ısıtma hızını ele alan Akan, deneylerini 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C ve 600 °C sıcaklık değerleri doğrultusunda, 150 °C/dk, 300 °C/dk, 450 °C/dk, 600 °C/dk, 750 °C/dk ısıtma hızı ve 1, 11, 21, 31 ve 41 barlık basınç değerlerinde gerçekleştirmiştir. Üretmiş olduğu sıvı ve katı mamüllerin verimini RSM (Cevap yüzeyi metodu) tekniğiyle tespit etmiştir. Sıvı ürüne bakıldığında en uygun değerlerin; 1 bar basınç, 513,13 °C sıcaklık ve 489,40 °C/dk ısıtma hızında olduğu belirtilmiş, bu şartlar altında %32,98'lik bir verim değeri bulmuştur. Katı pirolitik ürünün en uygun üretim şartları ise; 41 bar basınç, 400 °C sıcaklık değeri ve 150 °C/dk ısıtma hızı olacak şekilde belirtmiş ve %41,23'lük bir randıman değeri saptamıştır (Akan 2013).

Dyjakon ve Noszczyk gerçekleştirdikleri deneylerde, biyokütle kaynağı için meşe palamudu, at kestanesi ve ladin kozalakları gibi ormanlardan elde edilen kalıntıları kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar oksijen bulundurmayan bir ortamda 200 °C-320 °C sıcaklık değerlerinde ve 20 °C sıcaklık değerleri aralığında farklı sıcaklık noktalarında gerçekleştirmişlerdir. Ham ve işlenmiş düzeyde bulunan malzemeler; su içeriği, yakın analiz, enerji verimi, sabit karbon içeriği ve yoğunluk olmak üzere bazı farklı testler uygulanmıştır. Değerlendirmeler, yavaş piroliz prosesinde kullanılan biyokütle kaynaklarının yakıt özelliklerinin iyileştirilmiş olduğunu göstermişlerdir. 320 °C' de işlenmiş biyokütle özelliklerinin ise taş kömürü ile çok fazla benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır (Dyjakon ve Noszczyk 2020).

Yalçın, yapmış olduğu çalışmasında, biyokütle kaynağı için atık olan vişne çekirdeklerine sabit yataklı piroliz reaktöründe piroliz işlemi uygulayarak elde ettiği pirolitik yağın sıkıştırılması ile ateşlenen test için kullan bir motorda yakıt olarak kullanılabilmesine dönük analiz yapmıştır. Öncelikle piroliz yöntemiyle optimizasyon çalışmalarını yapmış olup; 0,5 l/dk itici azot gazının akış hızı, 10 °C/dk ısıtma hızı ve kırılmış (≤ 5 mm) tanecik boyutları şeklinde parçacık boyutu, on beş dk piroliz süresi ve 450 °C'lik reaktör sıcaklığında %29,7 maksimum seviyede sıvı verim değeri tespit etmiştir. Sonraki adımda ise üretmiş olduğu pirolitik yağın, içten yanma sistemine sahip bir dizel motorda yakıt olarak kullanılabilmesine istinaden fizikokimyasal açıdan optimum özelliğe sahip olan yakıt karışımları konusunda araştırmalar yapmıştır. Bu araştırmalar sonucunda ağırlıkça %40 oranında dizel yakıt içeren karışım yakıtları, en uygun karışım bileşenleri şeklinde belirlemiştir. En son adım olarak fizikokimyasal açıdan optimum niteliğe sahip pirolitik yağla karıştırılarak üretilen yakıt karışımlarının hava soğutmalı ve tek silindirli bir dizel motorda test ederek emisyon değerleri motor performansı üzerine etkileri dizelle kıyasladığında HC, NO_x ve is emisyonları açısından dizel yakıtla kıyasla daha çevreci emisyon değerine sahip olması yönüyle alternatif bir yakıt olarak kullanılabilir olması neticesine ulaşmıştır (Yalçın 2021).

Yaşar, yapmış olduğu çalışmasında, hurma çekirdeğini biyokütle kaynak olarak kullanmıştır. Ani piroliz deneyleri azot içeren bir ortamda sabit yataklı reaktörde gerçekleştirmiştir. Alıkonma süresi ve piroliz sıcaklığının elde edilen ürün verimine etkisini araştırmış ve aynı sıcaklıklarda hızlı piroliz deneyleri yaparak üretilen yağın ürün özelliklerini karşılaştırmıştır. Alıkonma süresi piroliz sıcaklığı sırasıyla 3-9 dk ve 400 °C-700 °C aralığında uygulamıştır. Maksimum char yüzey alanı, 500 °C ve 9 dk alıkonma süresiyle elde etmiştir. Maksimum biyoyakıt verimi, 500 °C piroliz sıcaklık değerinde ve 7 dk alıkonma süresinde tespit etmiş olup biyoyakıt verimi, özellikle 400 °C'den 600 °C değeri aralığında sıcaklık değerleri ile birlikte artış göstermiştir (Yaşar 2018).

Erdoğan, yapmış olduğu bu çalışmasında, biyokütle kaynak olarak seçmiş olduğu tavuk gübresi ve keçi gübresinin farklı veya saf karışım oranlarındaki örneklerini piroliz yöntemiyle incelemiştir.

Yapmış olduğu deneylerde vakumlu ve sabit yataklı piroliz reaktöründe 7 farklı sıcaklık değeriinde 300 °C-600 °C gerçekleştirmiştir. Deneylerde piroliz ürünlerinin verimini, karışım oranı ve sıcaklık değeriilerinin etkilerini incelemiştir. Sıcaklık değeriindeki artış ile beraber üretilen yağ ve buhar verimliliğinin yükseliş gösterdiğini; katran veriminde ise düşüş gerçekleştüğünü saptamıştır. En yüksek yağ verimini %58,90 tavuk gübresiinden 300 °C piroliz sıcaklık değeriinde, sabit yataklı reaktörde piroliz neticesinde elde etmiştir. En yüksek yağ veriminin ise %29,80 tavuk gübresiinin 500 °C piroliz sıcaklık değeriinde vakumlu piroliz reaktöründe piroliz işleminde elde etmiştir. Keçi gübresiinden en yüksek yağ verimi ise %48,80 ile 300 °C piroliz sıcaklık değeriinde elde etmiştir. Vakumlu piroliz reaktöründe 500 °C piroliz sıcaklık değeriinde keçi gübresiinin yağ verimini en yüksek %28,60 olarak elde etmiştir. Bu bağlamda tespit ettiğii deney değeriilerine tepki yüzey metodolojisini uygulayarak sürecin optimizasyonunu sağlamış, regresyon formülünü çıkarmış ve doğrulama deneyleriyle modelin doğruluğunu hesaplamıştır (Erdoğdu 2018).

Demir, yapmış olduğu bu çalışmasında atık şanzıman yağından piroliz tekniğii ile dizel yakıt üretimini gerçekleştirmiştir. Ürettiğii pirolitik yağ ile dizel yakıtı, ağırlıkça %20 oranında pirolitik yağ ve %80 oranında dizel yakıt olacak şekilde karıştırarak bir dizel jeneratör motorunda motor testlerine tabi tutmuştur. Motor testi olarak altı ayrı yanma test parametresi kullanmıştır. Bu parametreler; kümülatif ısı salınım hızı, basınç artış hızı, ortalama gaz sıcaklığı, kütleli yanma oranı, net ısı salınımı, silindir gaz basıncıdır. Motor testlerine tabi tutuktan sonra ise emisyon testlerini yapmıştır. Emisyon testleri kapsamında karbon monoksit (CO), hidrokarbonlar (HC), karbondioksit (CO₂), Oksijen (O₂) ve azot oksitleri (NO_x) emisyonlarının motor yüküne bağıli değeriışimlerini incelemiştir. Son aşamada ise yakıtların performans parametrelerinin tespit edilmesi amacıyla üç ayrı parametre için test yapmıştır. Bu testler, yakıt tüketim, efektif verim ölçümü ve özgül yakıt tüketiminin hesaplanması şeklinde sıralanmaktadır. Genel olarak karışım yakıt kullanımında performans ve yanma değeriilerinde benzerlik olup değeriışim %1-3 seviyelerindedir. CO₂ emisyonunda %20-30 yükseliş, NO_x emisyon değeriilerinde %13-20 yükseliş olduğunu saptamıştır. Bu bağlamda yapılmış testlerin sonuçlarına bakıldığında ise üretilen atık şanzıman yağı katkıli karışım yakıtın hedeflenen amaca uygun bir şekilde dizel yakıtın yerine kullanılabileceğini ifade etmiştir (Demir 2021).

2.3 Enerji ve Enerji Kaynakları

Enerji, insanlık tarihi boyunca ulusların vazgeçilmez kaynağı konumundadır. Gelişmelerin temelinde hayvancılık ve tarımsal faaliyetler ön plandadır. Endüstrileşme süreci ile beraber enerji, ekonominin gidişatını etkilemiştir. Enerji kullanımı yaşam standardını olumlu yönde etkilemiştir. Dolayısıyla endüstrileşmenin de etkisi ile enerjiye duyulan gereksinim oldukça artmıştır (Aydın 2010).

Enerji günden güne insan hayatının vazgeçilmez ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir. Enerji kavramı, kaynak bakımından iki bölümde incelenmektedir. Kullanılan enerjinin çeşitli kaynaklara göre ayrılması yenilenemez ve yenilenebilir enerji olarak sınıflandırmasını sağlamaktadır. Başka bir ifade ile geri kazanımına ve kaynaklarına göre birincil ve ikincil enerji kaynağı olarak isimlendirilebilir (Yıldırım 2019).

Enerji oldukça kapsamlı bir kavram olduğundan dolayı pek çok şekilde sınıflandırılabilir. Bazı enerji çeşitleri hemen kullanılabilmeye elverişli iken bazı enerji kaynaklarının ise kullanılmadan önce dönüştürülmesi gerekmektedir. Enerji yapısının değişip değişmemesine kıyasla birincil ve ikincil enerjiler olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil enerji çeşitleri; doğal gaz, petrol ve kömür vs. gibi ilk yapısını koruyabilen enerjiler şeklinde sınıflandırılır iken; ikincil enerji çeşitleri, canlılar tarafından türetilen enerji şeklinde tanımlanabilmektedir ve elektrik enerjisi, ısı enerjisi ve mekanik enerji bu sınıflandırmaya örnek olarak verilebilmektedir. Diğer bir sınıflandırma grubu ise enerji çeşidinin uzun süre zarfında kullanılıp kullanılamamasına istinaden yapılan sınıflandırma şeklidir: Yenilenebilir ve klasik (yenilenemez) enerjilerdir. Yenilenemez enerjilere örnek olarak, doğal gaz, petrol ve kömür verilebilirken, yenilenebilir enerji kaynaklarına ise örnek olarak biyokütle, jeotermal, güneş, hidrolik ve rüzgâr enerjisi verilebilir. Enerjiler çevre üzerindeki etkileri açısından temiz olmayan ve temiz enerji olarak da sınıflandırılabilirken enerji yoğunluklarına göre de yoğun olmayan ve yoğun olan enerji şeklinde de sınıflandırılabilir. Petrol ve türevleri yoğun enerji sınıfında iken, rüzgâr ve güneş enerjisi yoğun olmayan enerji sınıfına girmektedir (Yağcı 2021).

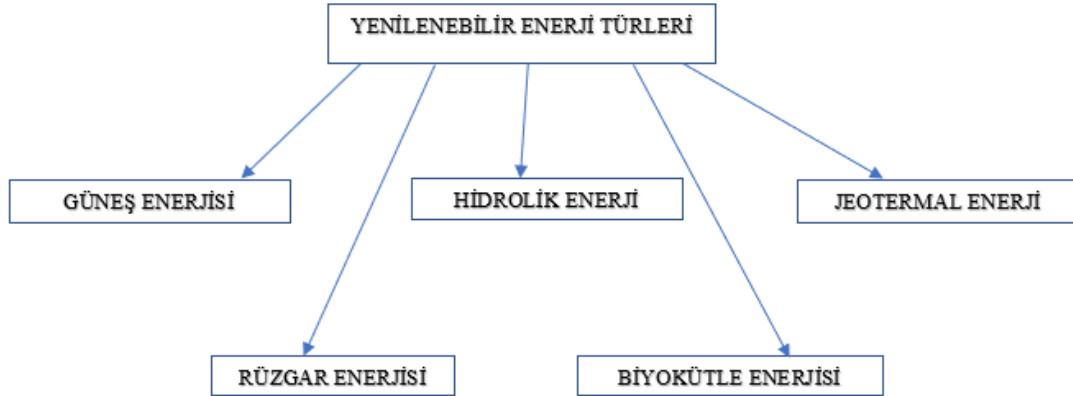
2.3.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları

Enerji, literatürde en genel tanımı ile yapılmakta olan iş ya da ısıyı meydana getirme kabiliyetidir. Dolayısıyla ortaya çıkan enerji; optik, kimyasal dönüşüm, ısı, kuvvet, vb.dir. Yenilenemeyen enerji kaynakları, yapılan iş sebebi ile kullanıldığı zaman tükenerek geri dönüşümü mümkün olmayan kaynak çeşitlerindendir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının başlıcaları; kömür, doğal gaz ve en önemlilerinden petrol ve türevleri benzeri fosil yakıt çeşitleridir. Mevcut düzende dünyada bulunan enerji kaynaklarının en başında fosil yakıtlar gelmektedir (Bhattacharyya 2011).

Doğada gösterdiği varlık ve kullanım şekliyle ters orantı gösteren yenilenemez enerji kaynakları ortalama bir ömre sahip olmaktadır. Çekirdek ve fosil temelli olan yenilenemeyen enerji kaynakları temel yakma işleminin peşi sıra yüksek orana sahip enerjiyi ortaya çıkarabilmektedir. Dünya üzerinde tüketilmekte olan enerjinin oldukça büyük payını dolduran bu enerji kaynaklarının doğa içinde meydana gelebilme süreleri oldukça uzun olmasından dolayı, enerjinin tüketilme hızını karşılayamamaktadır. Bu sebeple yakın gelecekte enerji kaynaklarının tükenmesi kaçınılmaz bir sonudur. Doğal gaz, kömür ve petrol gibi enerji kaynakları yenilenemeyen enerji kaynaklarına örnek olarak gösterilmektedir (Gezen ve Karaaslan 2017).

Yenilenemeyen enerji kaynaklarının üretilmesi ve kullanılması durumu oldukça yaygındır. Ülkelerin yenilenemeyen enerji kaynaklarını dışarıdan satın alma ya da kullanma yönelimlerinin nedenlerinden biri yenilenebilen enerji kaynağı çeşitlerini ülkedeki enerji üretimine katkı sağlayabilmesi için elde bulundurdıkları teknolojinin gelişmişlik seviyesi ve sermayeyle doğru orantılı bir şekilde olmasıdır. Diğer bir neden ise yenilenebilen enerji kaynaklarına ait tesislerinin kurulabilmesinin ülkelerin ekonomisine başlangıç evrelerinde ağır bir yük getirecek olmasıdır (Yağcı 2021).

2.3.2 Yenilenebilen Enerji Kaynakları



Şekil 2.1 Yenilenebilen enerji kaynağı çeşitleri.

Yenilenebilen enerji kaynakları kendisini devamlı bir şekilde yenileyen bu sebeple belirli bir kullanım ömrüne sahip olmayan ve insanlık tarihince kullanıldığı halde tükenmeyen enerji kaynağı çeşididir. Yenilenebilen enerji kaynağı çeşitleri; jeotermal, biyokütle, rüzgâr, hidrolik, dalga ve güneş enerjisi gibi enerji kaynaklarıdır. Bu kaynak çeşitleri içerisinde güneş enerjisi büyük bir paya sahiptir (Üçgül ve Elibüyük 2017).

2.3.2.1 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, füzyon işlemi sonucu yani çekirdekte gaz halde bulunan hidrojenin helyum gazına dönüşmesiyle ortaya çıkan ısıma enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Bu sebeple güneş, süreklilik gösteren füzyon reaktörü olarak kabul görmektedir. Hidrojen gazının helyuma dönüşümü işlemi sırasında sn.de 4×10^6 ton kütlenin enerjiye dönüşmesiyle tahmini olarak 386×10^6 EJ (Eksa Joule) ($1 \text{ EJ} = 22,7 \text{ MTEP}$ -Milyon ton eşdeğer petrol) değerindeki enerji, radyasyon olarak atmosfere yayılmaktadır. Bu işlemin milyarlarca yıl boyunca daha da devam edecek olması güneşin, gezegenimiz için sonu olmayan bir enerji kaynağı olması anlamına gelmektedir (Kılıç 2015).

2.3.2.2 Hidrolik Enerji

Hidrolik enerji, suda bulunan potansiyel enerjiden öncelikle kinetik enerjiye ardından ise mekanik enerjiye dönüştürülmesi ile elde edilen ve doğrudan su gücüne bağlı bir enerji çeşididir.

Suyun gücünden faydalanma su değirmenleri vasıtasıyla MÖ ilk çağlarda başlamıştır ve günümüzde de vazgeçilmez ve önemli bir enerji kaynağı olma özelliğini devam ettirmektedir (Aykaç 2021).

2.3.2.3 Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr türbinleri vasıtasıyla rüzgâr enerjisi yakalanarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Rüzgâr türbinleri, türbin kanatlarının yardımı ile rüzgârdan elde ettiği gücü kullanır ve bu sayede mekanik güce dönüştürme işlemini yapar. Rüzgâr gücünden mekanik güce dönüştürülme işlemi aerodinami ile yapılmaktadır.

Var olan güç rüzgâr hızının şiddetine bağlıdır, fakat oluşabilecek oluşacak hasarı önleyebilmek amacıyla gücü daha şiddetli rüzgâr hızında kontrol altına alabilmek ve limitlerini belirleyebilmek oldukça önemlidir. Güç miktarının sınırlandırılması, durma kontrolü (bıçağın bulunduğu konum sabittir fakat rüzgârın kesilmesi, daha kuvvetli rüzgâr hızında bıçak yüzeyince görülmektedir) ya da aktif durma (kanat açıları, kanatlar üzerinde durma oluşturabilme amacıyla ayarlanmaktadır) veya eğim ile yapılabilmektedir. Kontrol (kanatlar daha kuvvetli rüzgâr şiddetinde döndürülmektedir), dolayısıyla bu da görüldüğü üzere güç eğrilerine sebep olmaktadır (Zeray 2010).

2.3.2.4 Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, dünya tabanından çekirdek yönünde ilerleme gösterdikçe çekirdek ısının oluşturmuş olduğu ısıdan kaynaklı yer altı sularından elde edilen sıcak su, gazların ve buharların bünyesinde bulundurdıkları enerjinin dolaylı ya da doğrudan olarak kullanılmasıyla meydana gelir.

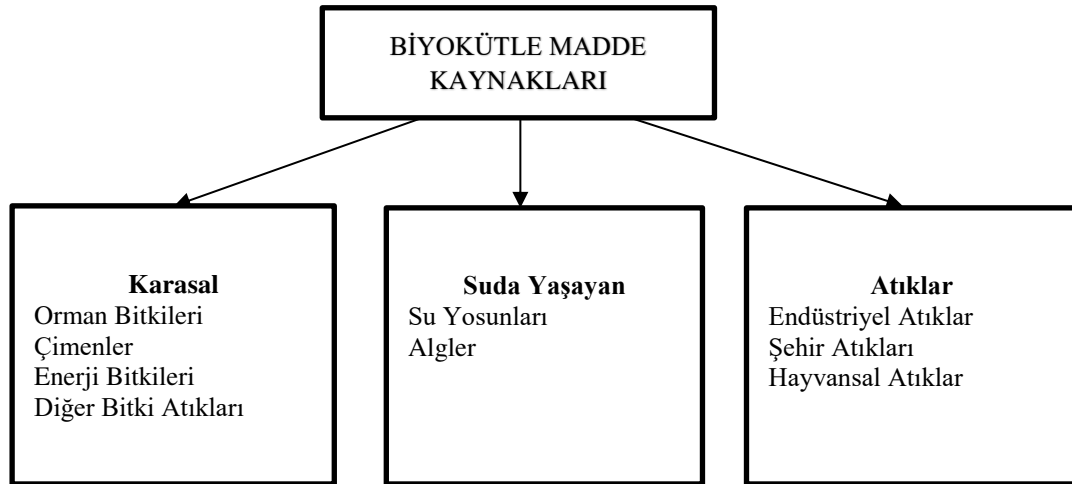
Jeotermal enerjinin kullanım alanlarını açıklayacak olursak; ısınma ve elektrik üretimi en üst sıralarda tercih edilen alanlar arasında gösterilmesi ile beraber kimyasal maddeler üretimi, termal turizm ve maden suyu üretilmesi gibi kullanım yerleri de bulunmaktadır. Türkiye'nin coğrafi konumu itibarıyla fay hatlarına paralel olmasından kaynaklı oldukça zengin bir jeotermal enerji potansiyeli bulunmaktadır (Alper 2019).

2.3.2.5 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, bir asırdan daha az sürede kendisini yenileyebilen, suda ya da karada yetişen her türlü bitkiyi barındıran ormansal, kentsel ve besin endüstrisi tarafından meydana getirilen atık maddelerin oluşturduğu organik maddelerin işlenerek elde edilen enerjiyi tanımlamaktadır (Bayraç ve Özarslan 2018).

Biyokütle, fosil yakıt olarak tanımlanmayan, biyolojik temelli olan bitkilerin güneşten elde ettikleri ışınlarla fotosentez oluşumunun ve kimyasal enerjinin oluşmasının meydana gelmesidir. Biyokütle enerjisi, organik içeriklere sahip maddelerin kullanımından elde edilmesinden dolayı çevre dostu ve aynı zamanda yenilenebilir bir enerji çeşididir. Birçok hayvansal, bitkisel, şehrsel ve endüstriyel atıkları biyokütle için kaynaktır. Birkaç örnek gösterecek olursak; şeker kamışı, saman, ağaç, hayvan gübresi, bitkisel atık yağlar, kestane kabuğu, hayvansal atık yağları ve atık olan ev çöpleri biyokütle enerjisine kaynak olacak şekilde kullanabilmek mümkündür (Yolcu 2019).

Biyokütle türlerinin çeşitliliği açısından oldukça fazla ürün çeşidini bünyesinde barındırmaktadır. Bu durumdan dolayı biyokütle enerjisi oldukça basit şekilde tanımlanırsa atıklar, su atıkları ve karasal atıklar şeklinde üç ana başlıkta sınıflandırabiliriz. Şekil 2.2’de biyokütle olarak sınıflandırılan madde kaynakları gösterilmektedir (Sözen vd. 2017).



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

2.4 Piroliz İşlemi

Piroliz işlemi; maddenin üç fazı olan sıvı, gaz ve katı ürünlerini oluşturabilmek amacıyla organik maddelerin oksijen içermeyen bir alanda ısı bozulmaya uğramasıyla ve aynı zamanda kimyasal yapılarında da gerçekleşecek olan daha küçük boyutlara dönüştürülmesi işlemidir (Koç 2011).

Piroliz işlemlerinin birçoğu oldukça yüksek sıcaklık değerleri arasında olan 300-1000 °C değerlerinde gerçekleşebilmektedir. Piroliz çalışma sıcaklığı arttıkça termal ayrışma da o denli yüksek olabilmekte ve bu yüzden yüksek bir ürün çeşitliliğinde artış gözlemlenebilmektedir (Mahmood 2020).

Piroliz işlemi neticesinde meydana gelen biyoyakıtların büyük bir çoğunluğu doğrudan veya karıştırmak suretiyle dizel bir motorda yakıt tercihi olarak kullanılması mümkündür. Dizel yakıtla karşılaştırıldığında yüksek viskoziteye sahip, akma noktası ve yoğunluk gibi istenmeyen sonuçlarla karşı karşıya kalınması sırasında klasik dizel yakıtla biyoyakıt karıştırılmak suretiyle dizel motorda kullanılabilmektedir (Calam 2019).

Piroliz tekniği üç ayrı yolla yapılabilmektedir. Bu yöntemler, hızlı piroliz, yavaş (geleneksel) piroliz ve ani (flash) pirolizdir. Bunlardan yavaş piroliz yöntemi, daha uzun yıllardır tercih edilen bir teknik olarak akademik kaynaklarda kabul görmekte ve en çok bilinen örneği de mangal kömürü üretimi olmaktadır. Bu yöntem yaklaşık 500 °C sıcaklık değerinde gerçekleştirilirken alıkonma süresi de 5-30 dk aralığındadır ve piroliz işlemi esnasında sisteme itici bir gaz verilmediğinden dolayı yavaş piroliz süreci sonlanana dek organik olan üründen elde edilen su buharı ısı değerinin sıfır noktasına gelene dek sistemin içerisinde bileşik ürün çıkarmaya devam etmektedir (Gümülügil 2016).

Hızlı piroliz işlemi, oksijensiz bir ortamda bir reaktörde biyokütle kaynağının yüksek sıcaklık değerine ulaşma durumudur. Hızlı piroliz işleminde hedef, oluşturulan sıvı üründen yüksek verim sağlamaktır.

Yüksek verim elde edebilmek için sisteme itici bir gaz akışı temin edilir ve ortaya çıkan gaz fazında bulunan ürünlerin oldukça hızlı bir biçimde olacak şekilde reaktörden uzaklaştırılmak suretiyle hızlı bir biçimde soğumaya uğramaları sağlanmış olmaktadır. Bu durum neticesinde meydana gelen gaz fazındaki ürünler ikincil ya da üçüncül bir tepkimeye girme imkânı elde edemeden reaktörden çıkarılıp sıvı fazda yakalanması amaçlanmaktadır. Hızlı piroliz işleminde kullanılması tercih edilen biyokütle dikkate alındığı takdirde ağırlıkça %15-25 katı, ağırlıkça %60-75 sıvı biyoyakıt, oluşan ürün ve yoğunlaşmış gazlardan ise ağırlıkça %10-20 arasında elde edilmektedir (Sarioğlu 2007).

Ani piroliz işleminde piroliz sıcaklık değeri en önemli kriter olarak söylenebilmektedir. Ani piroliz işleminde 400 °C sıcaklık değerinin altındaki sıcaklıklarda meydana gelen tepkimelerde piroliz ürünleri (katı ve gaz) ortaya çıkmaktadır. Pirolizin sıcaklık değeri 400 °C -650 °C olduğu durumlarda ise en yüksek verime sahip sıvı fazda bulunan ürünün meydana geldiği sıcaklık değer aralığı olarak kabul edilmekte ve bu aralıktaki sıcaklıkların üzerine çıkıldıkça oluşan sıvı fazdaki ürün veriminde düşüş görülmektedir. 650 °C sıcaklık değerinin artmasıyla atık gaz veriminde yükselişler gözlenmektedir. Bu yöntemde sistem 700 °C sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığında ise temel ürün olarak gaz fazda ürün amaçlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça ve kısa alıkonma sürelerinde yüksek verime sahip gaz fazda ürün oluşumu gerçekleşmektedir. Ani piroliz yönteminin üretim sıcaklık değer aralığı yaklaşık 400 °C-1250 °C'dir (Açıkgöz 2001).

2.4.1 Pirolizi Etkileyen Faktörler

2.4.1.1 Piroliz Sıcaklığının Deneylere Etkisi

Piroliz işleminde sıcaklık değeri, kullanılacak ürünün kimyasal yapısını ve özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Piroliz yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalarda 600 °C'den daha yüksek değerlerdeki sıcaklıklara çıkıldığında, doğal yağ ve oksidasyon reaksiyonlarından ortaya çıkan katı fazda ürünler gaz fazına geçiş yapmaktadır. Bu bağlamda pirolitik yağların verimi incelendiğinde çoğunlukla 400 °C-550 °C sıcaklık değer aralıklarında en yüksek verime ulaşılabilir.

700 °C sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığında ise dehidrasyon reaksiyonlarından kaynaklanan karbon miktarı üretilen pirolitik yağ içerisinde artmaktadır (Kan vd. 2016).

2.4.1.2 Parçacık Boyutunun Deneylere Etkisi

Piroliz yöntemiyle pirolitik yağ üretirken kaynak olarak kullanılan ürünün parçacık boyutu oluşan ürün verimini oldukça önemli ölçüde etkilemektedir. Parçacık boyutlarının küçük olması halinde piroliz işlemi sırasında reaktör içinde bulunan biyokütlenin parçacıklarının aralarında gerçekleşmekte olan ısının iletim hızı artış göstereceği için çoğunlukla 2 mm ve daha küçük parçacık boyutu kullanımı tercih edilmektedir. Kaynak olarak kullanılan ürünün parçacık boyutları artış gösterdiği hallerde, işlem sırasında reaktör içerisindeki ısı iletim hızı düşeceğinden dolayı daha düşük oranda tercih edilmektedir (Kara 2012).

Parçacık boyutunun daha düşük olması halinde ise oluşan gaz fazda ürünün verimliliğinde artış gözlemlenirken; sıvı fazda ürünün yakıt özellikleri taşımaya başlaması gözlemlenmektedir (Özen 2014).

2.4.1.3 Isıtma Hızının Etkisi

Piroliz yöntemi ile pirolitik yağ üretimi esnasında kullanılan biyokütle atığının sıcaklık değerin artırılma hızı, işlem sonucundaki ürün verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu bağlamda ısıtma hızı, piroliz işlemi sonrası oluşan sıvı, katı ve gaz fazda ürünlerin miktarlarına pozitif ya da negatif yönde etki etmektedir. Dolayısıyla piroliz işlemi yapılırken ısıtma hızında değişiklikler uygulanarak optimum verime ulaşılabilir (Kutlu 2010).

2.4.1.4 Sürükleyici Azot Gazı Akış Hızının Deneylere Etkisi

Durak, gerçekleştirdiği deneyler neticesinde sürükleyici azot gazının akış hızının artmasıyla beraber meydana gelen katı fazda ürünün yükseliş gösterdiğini fakat gaz fazındaki ürün miktarının azalış gösterdiğini tespit etmiştir.

Sürükleyici azot gazı akış hızının 0,5 l/dk değerinden 1 l/dk değerine getirildiği takdirde meydana gelen sıvı fazdaki ürünün veriminde düşüş gözlemlenmiştir.

Buna ek olarak sürükleyici azot gazı akış hızının 1 l/dk değerinden 1,5 l/dk değerine çıkarılması durumunda ise oluşan sıvı fazda ürünün veriminin yükseldiğini belirtmiştir. Piroliz yöntemi sonucu elde ettiği sıvı fazdaki ürün verimi ile sürükleyici azot gazı akış hızının arasında ters orantı olduğunu gözlemlenmiştir (Durak 2021).

2.5 Pirolitik Yağ Özellikleri

2.5.1 Viskozite

Viskozite, akışkan maddenin akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Yakıtların akış yeteneğini belirleyen en önemli özelliklerden bir tanesidir. Akmaya karşı direnç gösteren viskozite, akma atomizasyonunda ve akma nüfuziyetinde oldukça büyük paya sahiptir. Pirolitik yakıtların viskozitelerine bakıldığında geleneksel fosil yakıtlara kıyasla daha büyük moleküler kütleye ve kimyasal yapıya sahip olduklarından dolayı viskozitelerinin on ila on beş kat daha fazla olduğu görülmektedir.

Yüksek viskoziteye sahip yakıt türleri yeterli olmayan yakıt atomizasyonuna sebep olmakta ve bu yüzden termal verimlilikte azalmalara ve kurumda birikintilere oluşmasına neden olmaktadır. Diğer bir durumda, düşük viskozite, daha ince yakıt damlacıkları meydana getirerek enjektör tarafından yakıtın yanma odasına pompalanması daha kolay hale getirilir (Sakthivel vd. 2018).

2.5.2 Yoğunluk

Yoğunluk kavramı, maddenin birim hacmindeki kütlesi şeklinde tanımlanmaktadır. Yoğunluk, motorun performans değerleri açısından oldukça önemli bir paya sahip değişkendir. Yakıt enjekte etme sistemi yakıtın hacimsel olarak hesaplanıp gönderilmesine dayanmaktadır. Bu bağlamda yakıtın yoğunluk değerlerindeki farklılıklar direkt olarak motor performansını etkilemektedir. Pirolitik yağın yoğunluğu klasik dizel yakıtın yoğunluk değerinden daha yüksektir (Alptekin 2007).

Pirolitik yakıtlar ile klasik dizel yakıtlar arasında kıyaslama yapıldığında; pirolitik yakıtların daha yoğun ve daha az sıkıştırılabilir özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Yoğunluk, motor performansı ve emisyon üzerindeki etkileri açısından viskozite kavramı ile benzer bir katkıya sahiptir (Zaharin vd. 2017).

2.5.3 Setan Sayısı

Setan sayısı, yakıt kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir parametredir. Setan sayısı, yakıtın enjekte edilmesinden sonra kendiliğinden tutuşma yeteneğinin belirlenmesinde etkilidir. Yakıt içeriğindeki setan sayısı yükseldikçe yakıtın silindire enjekte edilmesiyle kısa süre içerisinde yanmaya başlar ve bu sayede ateşleme kalitesinin iyileşmesi sağlanır. Düşük setan sayısına sahip yakıtlarda ateşlemeye direnç görülür bu yüzden ateşleme süresinin gecikmesi söz konusudur. Setan sayısı, beyaz duman, stabilite, yanma, gürültü, CO ve HC emisyon kriterleri gibi motordaki performans değişkenlerini etkilemektedir. Bu durum neticesinde biyodizel yakıt ile geleneksel dizel yakıt kıyası yapıldığında biyodizelin oldukça yüksek bir setan sayısına sahip olmasından dolayı daha yüksek yanma verimliliği görülmektedir (Samaraae 2017).

2.5.4 Su İçeriği

Motorlarda yakıt olarak kullanılan biyodizel ya da dizel yakıtın içinde su bulunması halinde motorlarda oldukça ciddi zararlar oluşmaktadır. Yakıtın içerisinde bulunan su dizel motora ciddi zararlar vermenin yanı sıra performans kayıplarına da yol açmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yakıt içerisindeki su, istenmeyen zararlı maddedir. Biyodizelin saflaştırma işleminin yapılması amacıyla su ile yıkama işlemi yapılır. Bu yıkama işleminin ardından atık halde bulunan tortu maddeler biyodizel içinden uzaklaştırılır fakat yıkama işleminden ötürü biyodizelin içerisine su karışmış olur. Karışan suyu biyodizelden ayırtırmak gerekmektedir. Ayırtırma işleminin yapılabilmesi için biyodizelin ayırtırma kabında yedi ile sekiz saat arasında bekletip sonrasında ise yetmiş ile seksen derece sıcaklıklarda döner bir buharlaştırıcı vakum altında tutulmalıdır (Doğan ve Okumuş 2019).

2.5.5 Kükürt İçeriği

Sülfür oksidin sebep olduğu asit yağmurlarının tehdidi nedeniyle yetkililer tarafından yürürlüğe konulan yönetmelikler yakıt içerisinde bulunan sülfür miktarını ciddi oranda kısıtlamaktadır. Yakıtta bulunan kükürt miktarı yanma sırasında oluşan kükürt oksit emisyonunun büyüklüğünü direkt olarak etkilemektedir. Bitkisel kaynaklardan üretilen pirolitik yağın oldukça düşük kükürt değerlerine sahip olduğu görülürken bu duruma karşın hayvansal kaynaklı pirolitik yağların kükürt içeriği yüksek bir aralıkta bulunmaktadır (Sakthivela vd. 2018).

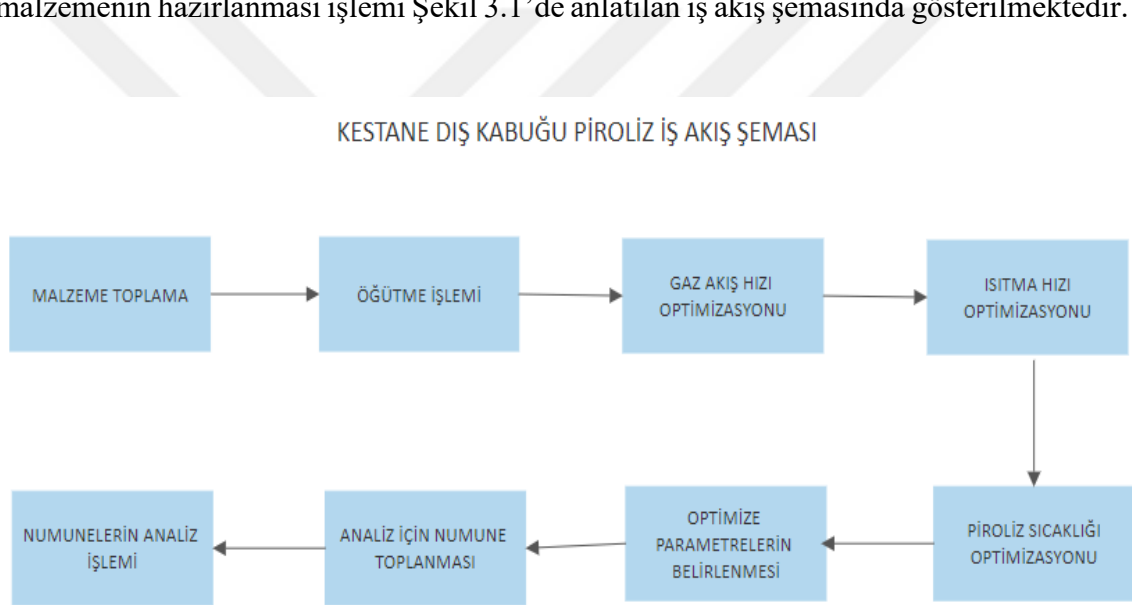


3. MATERYAL METOT

Yapılan bu tez çalışmasında pirolitik yağ elde edebilmek amacıyla piroliz tekniği kullanılmıştır. Yapılmış olan deneylerin ilerlemesinde kullanılan işlemlere ait tüm proses adımları ve bu amaçla kullanılmış olan materyalin elde edilmesinde tercih edilen yöntem ifade edilmiştir.

3.1 İş Akış Şeması

Yapılmış olan bu deneysel faaliyetlerin bütün işlem adımları ve kullanılan materyal ve malzemenin hazırlanması işlemi Şekil 3.1’de anlatılan iş akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 3.1 İş akış şeması.

3.2 Deneylerin Çalışma Düzeni ve Ekipmanlar

Bu tez çalışmasında, pirolitik yağın elde edilmesinde biyokütle kaynaklarından biri olan kestane dış kabuğu kullanılmıştır. Pirolitik yağın üretimi sırasında kullanılan parametrelere; sıcaklık, itici azot gazının hızı ve ısıtma hızıdır. Bursa’nın Orhaneli ilçesinden toplanmış olan kestane dış kabukları güneş altında kurutma işleminden sonra öğütme makinesinden geçirilmek suretiyle dikenli kabuk oldukça küçük boyutlara indirgenmiştir. Parçacık boyutlarının büyük çoğunluğu 0-2 mm arasındadır.

Deneylerde kullanılan parametreler şu şekildedir; 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklık değerlerinde, 0,5 l/dk, 1 l/dk ve 1,5 l/dk itici azot gazının akış hızında 5 °C/dk, 10 °C/dk, 15 °C/dk ısıtma hızıdır.

3.2.1 Kestane Dış Kabuğu

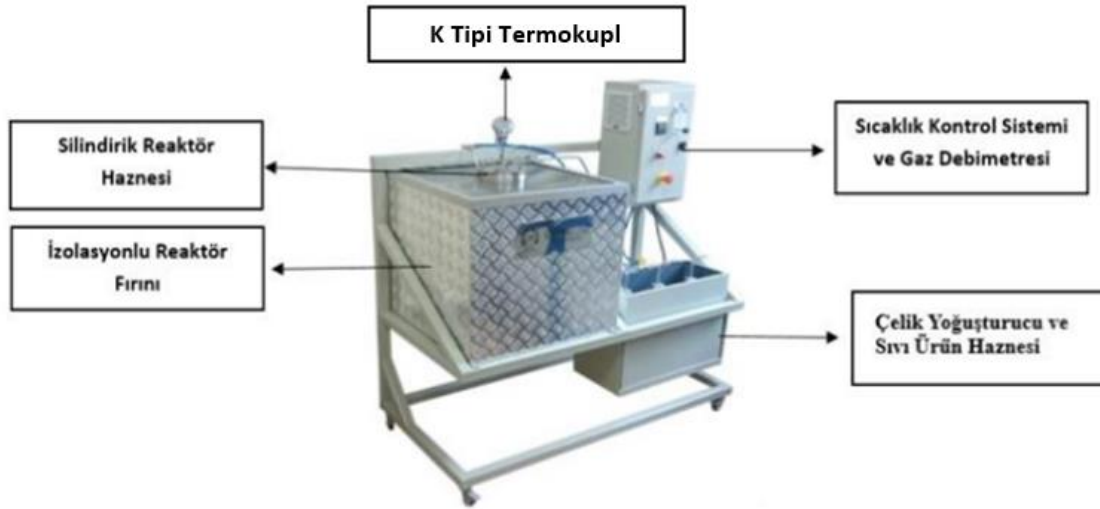
Kestane ağağları dikenli ağağ grubunda yer almaktadır. Yapraklarının kenarları testere dişli ve biraz serttir. Kestane ağağları çoğunlukla kumlu topraklarda ve kayalık yamaçlarda yetişir. Kestane ağacı kireçli toprakları sevmemektedir. Bursa ilinde yetişen kestaneler oldukęa üne sahiptir. Yabani olarak yetişen kestaneler olduğu gibi yemiş olarak tüketilen kestane çeşitleri de bulunmaktadır. Yabani olarak yetiştirilen kestanelerin boyları 20-30 metre arasında değişmektedir. Kestane ağağlarının ömürleri en fazla 650-700 yıl kadardır. Çoğunlukla 5-6 metre yüksekliğe sahiptir. Resim 3.1’de kestane dış kabuğunun yaş hali görölmektedir.



Resim 3.1 Kestane dış kabuğunun yaş hali.

3.2.2 Piroliz Cihazı

Piroliz cihazı, oksijen bulundurmayan bir reaktör içinde bulunan organik temelli bileşiklerin yüksek sıcaklık değerlerinde parçalanması sonucu sıvı, katı ve gaz fazda ürünlerin oluşmasını sağlayan bir ekipmandır. Piroliz cihazının ebatları 600x1200x1500 mm ölçülerindedir ve 1000 g numune hacmine sahiptir. Piroliz sıcaklık değerleri 100 °C -600 °C arasında değişim gösterirken ısıtma hızı dakikada 1 °C-15 °C'dir. Piroliz cihazının imalatında paslanmaz çelik kullanılması sebebiyle işlem esnasında oluşabilecek yüksek sıcaklık değerlerinden ve çevresel etmenlerden etkilenmemesi sağlanmaktadır. Piroliz işlemi tamamlandıktan meydana gelen katı fazdaki ürün, cihazın soğumasıyla beraber reaktörden alınır. Sıvı fazdaki ürün ise bir haznede biriktirilir. Ayrıca gaz fazdaki ürünler için trap haznesi mevcuttur. Deneylerde kullanılmış olan piroliz cihazı Resim 3.2'de görülmektedir.



Resim 3.2 Piroliz cihazı.

3.2.3 Hassas Terazi

Piroliz yöntemiyle yapılan deneyler sonucunda meydana gelen pirolitik yağ miktarı, kömür miktarı ve su miktarı ölçülürken hassas terazi kullanılmaktadır. Ölçüm esnasında 0,01 ölçme hassasiyetine sahip, 500 g ağırlık kapasiteli SF-400C dijital terazi kullanılmıştır. Deneylerde ölçüm yapılan hassas dijital terazi Resim 3.3'te aktarılmıştır.



Resim 3.3 Hassas terazi.

3.2.4 Ayırma Hunisi

Piroliz işlemi tamamlandıktan sonra boruların cidarlarında kalan pirolitik yağın alınabilmesi için diklorometan kullanılır. Pirolitik yağın alınma işleminin tamamlanmasının ardından, piroliz işlemi sonrasında meydana gelen suyun ve alınan pirolitik yağ ile diklorometanın heterojen karışım özelliği göstermesi sonucu ayırma hunisinden faydalanarak ayrıştırma işlemi yapılmaktadır. Silindir şeklinde ve cam yapıda bulunan ayırma hunisi, heterojen sıvı karışımlarının sabit bir düzenden tutulabilmesine olanak sağlamak amacıyla bir açma-kapama vanasına sahiptir. Pirolitik yağ ile diklorometan birbirine homojen şekilde karışmaktadır. Su ise bu karışıma heterojen bir karışım özelliği göstermektedir. Ayırma hunisi aracılığıyla heterojen karışım özelliğinden faydalanarak su, pirolitik yağ ile diklorometandan ayrılabilir.



Resim 3.4 Ayırma hunisi.

3.2.5 Evaporatör Cihazı

Piroliz işlemi sonucunda boru cidarlarında kalan pirolitik yağın alınması için kullanılan diklorometan ile pirolitik yağ birbirlerine homojen karışmaktadır. Bu homojen karışımdan diklorometanın ayrıştırılması gerekmektedir. Ayrıştırma işlemini yapabilmek için evaporatör kullanılmaktadır. Pirolitik yağın diklorometandan ayrıştırılması işleminde kullanılan evaporatörün çalışma sıcaklık aralığı 20 °C -220 °C arasında olup döndürme hızı 10-295 rpm'dir. Çalışmalar sırasında aşağıda bulunan Resim 3.5'te Heidolph marka G3 model evaporatör cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.5 Evaporatör cihazı.

3.2.6 Diklorometan Maddesi

Diklorometan kaynama noktası 39,6 °C olan CH_2Cl_2 formülüne sahip metilen klorür olarak da isimlendirilen suyla karışmayan rengi olmayan bir sıvıdır. Piroliz işleminin tamamlanmasının ardından üretilen pirolitik yağın boru cidarlarına yapıştığı görülmektedir. Üretilen pirolitik yağ veriminin artırılması amacıyla boru cidarlarına yapışmış vaziyette kalan yağın alınması amacıyla diklorometan kullanılmaktadır.



Resim 3.6 Diklorometan maddesi.

3.3 Pirolitik Yağın Elde Edilmesi Yöntemi

Pirolitik yağ üretmek amacıyla toplanan kestane kabukları yaklaşık bir hafta boyunca açık havada güneş altında tamamen kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Kuru haldeki kestane dış kabukları öğütme makinesi kullanılarak küçük parçacıklar haline getirilmiştir. Elde edilen dikenli dış kabuklar 0-2 mm çapındaki elekten geçirilmiştir. Öğütme makinesi Resim 3.7’de gösterilmiş olup teknik özellikleri; 3 kW, 380 V ve 3000 dev/dak AC şeklindedir.



Resim 3.7 Öğütme makinesi ve içerisinde bulunan kestane dış kabukları.

Pirolitik yağ üretim çalışması Afyon Kocatepe Üniversitesinde bulunan Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümüne ait piroliz laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Reaktörde yakılacak olan kestane dış kabukları 0-2 mm elek vasıtasıyla elenerek numune hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon deneylerini gerçekleştirebilmek amacıyla hazır hale getirilen numuneler 100 g olacak şekilde Resim 3.8’de gösterilen hassas terazide tartılarak reaktöre konulmuştur.



Resim 3.8 Numunelerin hassas terazide tartılması işlemi.

Optimum parametrelerin bulunabilmesi için 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklıklarda 0-2 mm'lik numuneler kullanılarak pirolitik yağ üretilmiştir. Deneyler neticesinde üretilen yağ, su, kömür ve buharın kütlece oranları tespit edilmiştir. Belirtilen sıcaklık değerleri arasında optimum yağ miktarı 500 °C sıcaklık değerinde ölçülmüştür. Sıcaklık parametresinin ardından ikinci değişken olarak itici azot gazı akış hızının optimum değerinin saptanması için çalışmalar yapılmıştır. İtici azot gazının akış debileri: 0,5 l/dk, 1 l/dk ve 1,5 l/dk olacak şekildedir. Deneyler neticesinde en yüksek yağ üretiminin 1 l/dk'da gerçekleştiği görülmüştür. Ardından ısı artış hızının optimum değerini belirlemek amacıyla 5 °C/dk, 10 °C/dk ve 15 °C/dk olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar neticesinde optimum değer 10 °C/dk'da bulunmuştur. Çalışmalar sırasında reaktör sıcaklığının maksimum olduğu değerde alıkonma süresi 30 dk olarak belirlenmiş olup elde edilen veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.



Resim 3.9 Piroliz sonrasında meydana gelen kömür.

Deney sonucunda ortaya çıkan kömür Resim 3.9’da gösterilmektedir. Piroliz işlemi tamamlandıktan sonra çalışmakta olan makine kapatılır ve bir süre reaktörün soğuması beklenir. Gerekli cıvatalar sökülerek reaktör haznesinin açılması sağlanır. Reaktör, soğuması için serin bir yerde bekletilir. Bu işlem esnasında sistem içindeki kılcal borularda kalan pirolitik yağ, diklorometan kullanılarak alınmaya çalışılır. Bu işlem basınçlı kapta bulunan çözücü sıvının borulara iletilmesi ve ardından süzme tapasının açılarak çıkış haznesinden diklorometan ile borularda kalan pirolitik yağın uygun behere alınmasıyla yapılır. Elde edilen tüm pirolitik yağ ve diklorometan karışımı bir ayırma hunisine aktarılarak ayrıştırma sürecine hazır bir vaziyete getirilir. Ayırma hunisine aktarılan diklorometan, pirolitik yağ ve su bileşimi Resim 3.10’ da gösterilmiştir.



Resim 3.10 Pirolitik yağ ile suyun ayırıştırma işlemi.

Meydana gelen mahsuller ayırma hunisi kullanılarak aktarılma işleminin ardından belirli bir süre bekletilir. Bu sayede pirolitik yağ diklorometan karışımının dibine çökmesi sağlanır. Bu işlemin ardından vana açılarak yalnızca huninin içinde su ürünü kalana dek akıtma işlemi devam ettirilir. Kap içerisinde toplanan pirolitik yağ ve diklorometan karışımı içinde bulunan istenmeyen maddelerin süzdürülmesi için filtrasyon işlemi yapılır. Bu işlem Resim 3.11’de gösterilmiştir. Karışımın içinde bulunan istenmeyen partiküller, filtre kâğıdı kullanılarak ayrıştırıldıktan sonra pirolitik yağ ve diklorometanın birbirinden ayrıştırılma işlemi için evaporatör kullanılır.



Resim 3.11 Karışımın filtrelenmesi işlemi.

Karışım, sıcaklık değeri 50 °C olan su haznesine balon jojeler kullanılarak daldırma işlemi yapılır. Balon jojenin konumunun, cihazın üzerinde bulunan tuşlar aracılığıyla istenilen yükseklikte olması sağlanır. Evaporatörün çalışma koşullarına göre; Su sıcaklık değeri, 50 °C ve yaklaşık 290 dev/dak olacak şekilde; karışım 30 dk süresince ayrıştırılır. Kompresörün basınç değeri 200 psi- 400 psi olmak üzere ayarlanır.



Resim 3.12 Diklorometanın ayrıştırma işlemi.

Evaporatör sayesinde pirolitik yağ ile diklorometan ayrıştırılmış hale gelir. Bunun sonucunda elde edilen pirolitik yağın fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi için bir kaptan toplanır. Bu fiziksel değerlerinin belirlenebilmesi için bazı analizler yapılmaktadır.

4. BULGULAR

Pirolitik yağ üretiminde optimum verimi bulmak amacıyla sıcaklık, ısıtma hızı ile sürükleyici azot gazı akış hızı parametreleri kullanılarak optimizasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu 500 °C sıcaklık değerinde, 1 l/dk itici azot gazı akış hızında ve 10 °C/dk ısıtma hızı olmak üzere optimum verim elde edilmiştir. Çalışmalar sırasında alıkonma süresi 30 dk olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, kestane dış kabuğunun optimizasyon deney planı Çizelge 4.1’de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.1 Optimizasyon deney planı.

Çalışma No	Sıcaklık °C	Gaz Akış Hızı l/dk	Isıtma Hızı °C/dk	Piroliz Alıkonma Süresi dk
1	400	0,5	10	30
2	400	1	10	30
3	400	1,5	10	30
4	400	1	5	30
5	400	1	15	30
6	450	0,5	10	30
7	450	1	10	30
8	450	1,5	10	30
9	450	1	5	30
10	450	1	15	30
11	500	1	10	30
12	500	1	5	30
13	500	1	15	30
14	500	0,5	10	30
15	500	1,5	10	30

4.1 Sürükleyici Azot Gazı Akış Hızındaki Değişimin Ürün Oranına Etkisi

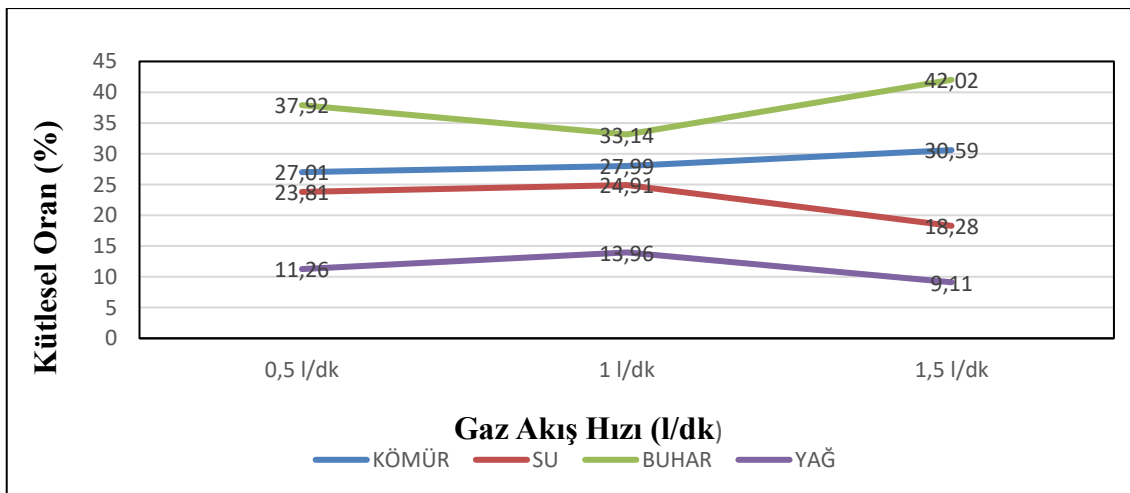
Sürükleyici azot gazı akış hızının optimum olduğu değer bulunurken yapılan deneyler; 400 °C sıcaklık değerinde, 10 °C/dk ısıtma hızında ve 30 dk tutulma süresinde tekrar yapılmıştır. Sıcaklık ve ısıtma hızı parametreleri sabit tutularak itici azot gazı akış hızı; 0,5 l/dk, 1 l/dk ve 1,5 l/dk olacak şekilde çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda üretilen pirolitik yağ sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 400°C’de gazın akış hızına bağlı meydana gelen ürünlerin oranı.

Sıcaklık (°C)	Ürünler (%)	Gaz Akış Hızı (l/dk)		
		0,5 l/dk	1 l/dk	1,5 l/dk
400 °C	Kömür	27,01	27,99	30,59
400 °C	Su	23,81	24,91	18,28
400 °C	Buhar ^x	37,92	33,14	42,02
400 °C	Yağ	11,26	13,96	9,11

x Aradaki fark oranı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 incelendiğinde itici azot gazı akış hızının 0,5 l/dk değerinden 1,5 l/dk değerine çıkarıldığında meydana gelen kömür miktarı oranının artış gösterdiği görülmektedir. En uygun yağ verimi; 1 l/dk olduğunda %13,96 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1 Sürükleyici gazın akış hızının ürünlerin kütle oranına etkisi.

Şekil 4.1'deki grafik incelendiğinde çalışmalar sonucu yağ üretiminin optimum değeri %13,96 ile 1 l/dk gaz akış hızında gerçekleştiği görülmüştür. Eğriler incelendiğinde; kömür veriminin itici gaz akış hızıyla orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Su oranına bakıldığında ise en yüksek 1 l/dk hızında gözlemlenirken; en düşük 1,5 l/dk hızında görülmüştür. Pirolitik yağ veriminin optimum olduğu şartlarda kömür oranı %27,99, su oranı %24,91 ve buhar oranı %33,14 olarak tespit edilmiştir.

4.2 Sıcaklık Değerindeki Değişimin Ürün Oranına Etkisi

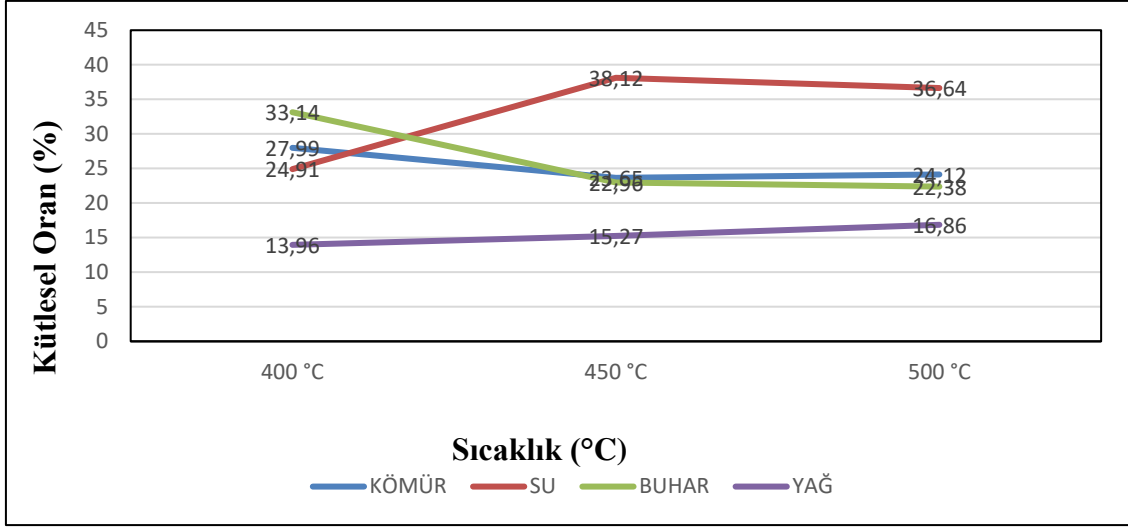
Yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan pirolitik yağın maksimum miktarda olması durumu için 1 l/dk itici azot gazı akış hızı ve 30 dakika alıkonma süresi tespit edilmiştir. Bu aşamaya gelinceye kadar sıcaklık değerleri sabit tutulmuş olup değişkenlerin optimum verim şartları bulunmuştur. Bu adımda ise 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklık değerlerinde pirolitik yağ ürününü elde etme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.3'e bakıldığında sıcaklık değerlerindeki değişimin ürünlerin oranlarına etkisi görülmektedir.

Çizelge 4.3 Sıcaklık farkına bağlı meydana gelen ürünlerin oranı

Sıcaklık (°C)	Kömür (%)	Yağ (%)	Su (%)	Buhar ^x (%)
400 °C	27,99	13,96	24,91	33,14
450 °C	23,65	15,27	38,12	22,96
500 °C	24,12	16,86	36,64	22,38

x Aradaki fark oranı ile hesaplanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 4.3'te de görüldüğü gibi sıcaklık değerleri yükseldikçe sıvı fazdaki ürün olan pirolitik yağın miktarında artış gözlemlenmiştir. Deneylerde sıcaklık değeri 400 °C'den 450 °C'ye çıkarıldığında su oranında belirli bir artış görülürken; gaz oranındaysa azalış görülmüştür. Sıcaklık değeri 450 °C'den 500 °C'ye artırıldığında ise su ve gaz oranında düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 Sıcaklık farklılıklarında meydana gelen ürünlerin kütle oranına etkisi.

Şekil 4.2'deki grafik incelendiğinde verimi en çok etkileyen parametrenin reaktör sıcaklığı olduğu anlaşılmaktadır. Deneylere 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Üretilen pirolitik yağın optimum verim değerine sahip olduğu deney parametreleri şu şekildedir: 500 °C sıcaklık, 1 l/dk sürükleyici gazın akış hızı, 10 °C/dk sabit ısıtma hızı ve 30 dk alıkonma süresi. Bu parametrelere göre üretilen pirolitik yağın verimi, kütlece %16,86 olarak tespit edilmiştir.

4.3 Isıtma Hızındaki Değişimin Ürün Oranına Etkisi

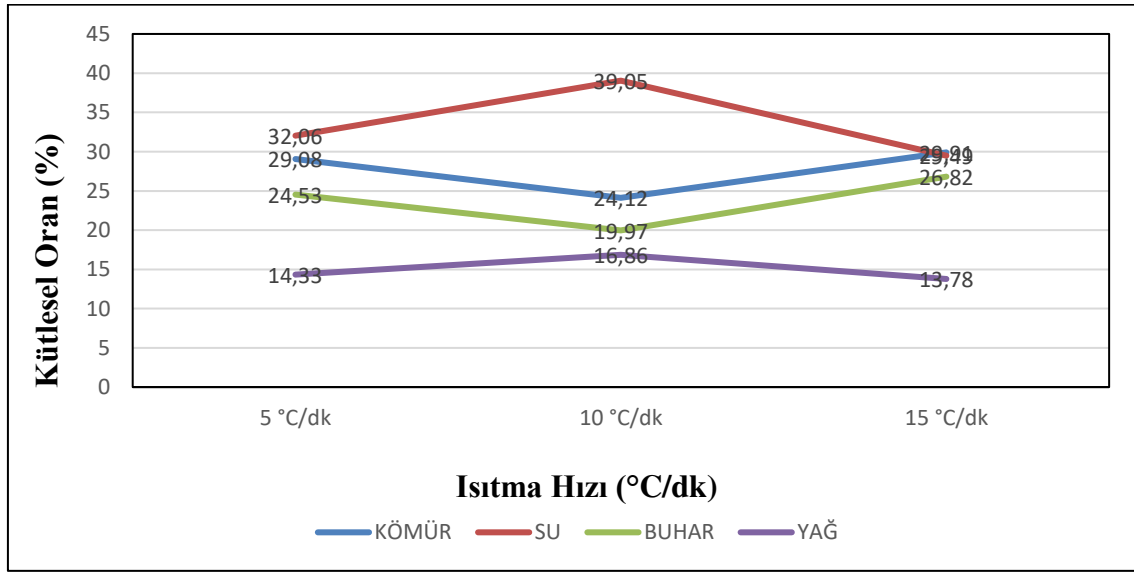
Çalışma planına göre optimizasyon değişkenlerinden bir diğeri ısıtma hızıdır. Yapılan deneylerde; 5 °C/dk, 10 °C/dk ve 15 °C/dk olacak şekilde üç ayrı ısıtma hızı kullanılmıştır. Üretilen pirolitik yağın maksimum verimde olması amacıyla, 500 °C sıcaklık değeri, 1 °C/dk ısıtma hızı ve 30 dk alıkonma süresi baz alınarak deneyler yapılmıştır.

Çizelge 4.4 Isıtma hızındaki farklılıklarına göre meydana gelen ürünlerin oranı.

Sıcaklık (°C)	Ürünler (%)	Isıtma Hızı (°C /dk)		
		5 °C/dk	10 °C/dk	15 °C/dk
500 °C	Kömür	29,08	24,12	29,91
500 °C	Su	32,06	39,05	29,49
500 °C	Buhar ^x	24,53	19,97	26,82
500 °C	Yağ	14,33	16,86	13,78

x Aradaki fark oranı ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4'e bakıldığı zaman yapılan deneyler sonucunda ısıtma hızı 5 °C/dk değerinden 10 °C/dk değerine yükseldiğinde kömür ve buhar oranı düşmekte; 10 °C/dk değerinden 15 °C/dk değerine yükseldiğinde ise kömür ve buhar oranında artış görülmektedir. Su ve yağ oranları incelendiğinde ise 5 °C/dk değerinden 10 °C/dk değerine yükseldiğinde artış; 10 °C/dk değerinden 15 °C/dk değerine yükseldiğinde ise düşüş izlenmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde; optimum değerler olan sıcaklık 500 °C, azot akış hızı 1 l/dk ve 30 dk alıkonma süresi referans olarak alınmıştır.



Şekil 4.3 Isıtma hızındaki farklılıklara göre meydana gelen ürünlerin kütle oranına etkisi.

Farklı ısıtma hızlarının etkisi Şekil 4.3'te görülmektedir. Grafik incelendiğinde optimum koşulların 10 °C/dk değerinde olduğu görülmüştür. Son değişkenin de tespit edilmesiyle pirolitik yağ üretiminin çalışmalar sonucu optimum parametreleri; 500 °C sıcaklık değerinde, 10 °C/dk ısıtma hızında, 1 l/dk sürükleyici azot gazı akış hızında ve 30 dk alıkonma süresinde olacak şekilde bulunmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda pirolitik yağ üretiminin optimum olduğu değerlerde üretilen pirolitik yağın kütlece oranı %16,86 olarak bulunmuştur. Buna ek olarak kömür oranı %24,12; su oranı %39,05; buhar oranı ise %19,97 olarak tespit edilmiştir.

4.4 Elde Edilen Pirolitik Yağın Özellikleri

Optimizasyon deney planına göre gerçekleştirilen deneyler neticesinde üretilmiş pirolitik yağın fiziksel özelliklerinin tayin edilmesi amacıyla ve Standard Laboratuvarlar İşletmeciliği A.Ş.'de, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) analizler yaptırılmıştır. Elde edilen pirolitik yağın analiz sonuçlarının dizel yakıtla kıyaslanması Çizelge 4.5’de görülmektedir.

Çizelge 4.5 Pirolitik yağın analiz raporu ve dizelle karşılaştırılması.

Analiz	Birim	Analiz Raporu	Dizel	Analiz Metodu
Kin. Viskozite (40 °C)	(mm ² /s)	8,60	1,5-4	TS 1451 EN SO 3104
Su	(mg/kg)	1,22	<200	TS 6147 EN ISO 12937
Yoğunluk	(g/cm ³)	1,147	0,82-0,845	PN EN ISO 3675
Kükürt	(ppm)	0,32	<0,01	TS 440 ISO 351

Laboratuvardan gelen analiz sonuçlarına bakıldığında; üretilen pirolitik yağın 40 °C sıcaklık değeri için kinematik viskozitesinin, yoğunluk değerinin ve kükürt oranının dizelle karşılaştırıldığında yüksek miktarda olduğu görülmekte olup su miktarının ise standart değer aralığında olduğu tespit edilmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında literatürlerde bulunan çalışmalardan farklı olarak incelenen biyokütle kaynağı kestane dış kabuğu olarak tercih edilmiştir. Pirolitik yağ üretimi deneylerinde üç farklı parametre kullanılarak yakıt üretiminin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Parametreler; sıcaklık, itici azot gazı akış hızı ve ısıtma hızıdır.

Optimizasyon deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlara göre, optimum yağ üretiminin parametre değerleri; 500 °C sıcaklık değeri, 1 /dk itici azot gazı akış hızı, 10 °C/dk ısıtma hızı ve 30 dakika sabit alıkonma süresi olacak şekilde tespit edilmiştir. Bu değişken değerlerine göre üretilen pirolitik yağın kütsel miktarlarının oranı şu şekildedir: Yağ miktarının kütsel oranı %16,86; su oranı %36,64; kömür oranı %24,12 ve buhar oranı %22,38 olacak şekilde tespit edilmiştir.

Yapılmış olan çalışmalar sonucunda en düşük pirolitik yağ üretim miktarı; 400 °C sıcaklık değerinde, 1,5 l/dk itici azot gazı akış hızında, 10 °C/dk ısıtma hızında ve 30 dakika sabit alıkonma süresinde gerçekleştirilmiş ve pirolitik yağ oranı %9,11 olarak saptanmıştır.

Meydana gelen pirolitik yağın araçlarda kullanılabilirliğinin tespiti amacıyla fiziksel analiz testleri uygulanmıştır. Bu analizler neticesinde, elde edilmiş olan pirolitik yağın fiziksel değerlerine bakıldığında 40 °C için kinematik viskozitenin yüksek olması ve yoğunluk değeri motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluğun önüne geçilebilmesi için üretilen yüksek kinematik viskoziteli ve yoğunluk değerli pirolitik yağ, dizel yakıt ile karıştırılmak suretiyle içten yanmalı motorlarda tercih edilebilir.

Bu çalışmada optimizasyon parametrelerinden sıcaklık değeri, ısıtma hızı ve sürükleyici azot gazı akış hızı değerleri çeşitlendirilerek ve ara değerler kullanılarak yakıt üretiminin optimizasyonunun daha verimli olabileceği öngörülmektedir. Biyokütle kaynağı olarak kullanılan kestane dış kabuğunun dikenli olmasından dolayı tanecik boyutu parametresi deneyler sırasında incelenememiştir.

6. KAYNAKLAR

- Açık M, 2019, Turunçgiller Atıklarından Piroliz Yöntemi ile Pirolitik Yağ Üretiminin Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 50s, Afyonkarahisar.
- Açıkgöz Ç, 2001, Keten Tohumunun Alternatif Enerji Kaynağı Olarak İncelenmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 193s, Eskişehir.
- 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.
- Al-Samarrae R, 2017, Perspective Of Safflower (Carthamus Tinctorius) As A Potential Biodiesel Feedstock In Turkey: Characterization, Engine Performance And Emissions Analyses Of Butanol-Biodiesel-Diesel Blends, Erciyes University, Graduate School Of Natural And Applied Sciences, MSc Thesis, 117s, Kayseri.
- Alper E C, 2019, Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Ekonomik Analizi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125s, Bursa.
- Alptekin E, 2007, Biyodizel ile Dizel Yakıtlarının Harmanlanmasında Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 124s, Kocaeli.
- Aydın F F, 2010, Enerji Tüketimi ve Ekonomik Büyüme, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 35, 317-340.
- Aykaç Z, 2021, Diyarbakır İlindeki Tarihi Su Değirmenlerinin Konumlarının ve Hidrolik Enerji Potansiyellerinin Araştırılması, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 161s, Diyarbakır.

- Ayyıldız M, 2014, Hızlı Piroliz Yöntemi ile Biyokütleden Elde Edilen Sıvı Ürünlerin Kimyasal Ekserjilerinin Hesaplanması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 114s, Trabzon.
- Bayraç H N, Özarslan B, 2018, Biyokütle Enerjisi ve Ekonomik Büyüme Arasındaki İlişkinin Ampirik Bir Analizi: Türkiye Örneği, Yalova Sosyal Bilimler Dergisi, 17, 1-17.
- Doğan T H, Okumuş Z Ç, 2019, Biyodizeldeki Suyun Reçine ile Uzaklaştırılması: Adsorpsiyon İzotermi, Kinetiği ve Termodinamik İncelemesi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 15, 561-570
- Durak M, 2021, Yabani Bitkilerden Pirolitik Yağ Üretimi ve Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 50s, Afyonkarahisar.
- Dyjakon A, Noszczyk T, 2020, Alternative Fuels from Forestry Biomass Residue: Torrefaction Process of Horse Chestnuts, Oak Acorns, and Spruce Cones, Institute of Agricultural Engineering, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, 13, doi:10.3390/en13102468.
- Elibüyük U, Üçgül İ, 2017, Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Enerji Jeopolitiği, Ankara E-Dergi, 2, 1-8.
- Erdoğan A E, 2018, Vakum Piroliz ve Sabit Yataklı Piroliz Ünitelerini Kullanılarak Hayvansal Atıkların Pirolizi ve İşlemlerin Tepki Yüzey Metodolojisi ile Optimizasyonu, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 107s, Karabük.
- Gezen M, Karaaslan A, 2017, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi, Ekin Yayınevi, Ankara
- Gümülügil E A, 2016, Taş Kömürü ve Biyokütlenin Katalitik Birlikte Pirolizi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Bilecik.
- 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.

- Kaygusuz Ö, 2020, Hızlı Piroliz Yöntemi ile Orman Atıklarının Pirolizi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 104s, Giresun.
- Kılıç F Ç, 2015, Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, Mühendis ve Makine Dergisi, 56, 28-40.
- Koç M, 2011, Biyodizel Üretimine Uygun Türkiye’de Yetişen ve Yetiştirilecek Bitkilerin ve Biyodizel Teknolojilerinin Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 247s, İstanbul.
- Koç M, 2019, İğde Çekirdeğinin Piroliz Kinetiğinin Termogravimetrik Analiz ile İncelenmesi, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Yalova.
- Kutlu N M, 2010, Göynük Bitümlü Şistinin Polipropilen ve Katalizör Varlığında Pirolizi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, Ankara.
- Namal C, 2018, Organik Atıkların Hızlı Pirolizi ile Biyoyağ Üretilmesi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 55s, Antalya.
- Özen F, 2014, Kömür ve Atık Pamuk Yağının Birlikte Pirolizi İle Elde Edilen Sıvı Yakıtın Dizel Motorlarda Kullanılabilirliği, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Batman.
- Sakthivel R, Ramesh K, Purnachandran R, Shameer P M, 2018, A Review On The Properties, Performance And Emission Aspects of The Third Generation Biodiesels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2970–2992.
- Sarıoğlu N, 2007, Mısır Saplarının Hızlı ve Katalitik Pirolizi ile Ürünlerinin Karakterizasyonu, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s, Eskişehir.
- 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.
- Yağcı G, 2021, Türkiye’nin Enerji Dönüşümü: Türkiye’nin Enerji Kaynaklarının Enerjide Dışa Bağımlılık Karşısında Etkin Kullanımı, Bahçeşehir Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 123s, İstanbul.

- Yalçın A H, 2021, Biyokütle Atıklarından Elde Edilen Alternatif Yakıt Kullanımının Motor Performans ve Emisyonlara Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 158s, Afyonkarahisar.
- Yaşar B, 2018, Hurma Çekirdeklerinden Ani ve Hızlı Piroliz Yöntemiyle Değerli Ürünlere Dönüştürülmesi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek, Lisans Tezi, 112s, Eskişehir.
- Yazar N, 2019, Piroliz Yöntemi ile Ceviz Kabuğundan Yakıt Üretiminin Optimizasyonu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 72s, Afyonkarahisar.
- Yelekin E, 2022, Meşe Palamudundan Piroliz Yöntemiyle Yakıt Üretiminin Optimizasyonu, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 41s, Afyonkarahisar.
- Yıldırım H H, 2019, Yenilenebilir Enerji Yatırımlarındaki Teşviklerin Yatırım Performansları Üzerine Etkisi, Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 4, 330-345.
- Yolcu A, 2019, Biyokütle Olarak Tatlı Sorgum Bitkisi Kullanan 5MW Elektrik Kapasiteli Biyokütle Santralinin İncelenmesi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 54s, Isparta.
- Zaharin M S M, Abdullah N R, Najafi G, Sharudin H, Yusaf T, 2017, Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 475-493.
- Zeray C, 2010, Renewabla Energy Sources, University Of Çukurova, Institute Of Natural And Applied Science, MSc Thesis, 130s, Adana.