



**KAYIN AĞACI ODUN PELETİNİN TORREFAKSİYONU  
VE TORREFİYE PELETLERİN YANMA DAVRANIŞI**

**Merve KAYA**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Melek YILGIN**

**Kasım-2019**

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAYIN AĞACI ODUN PELETİNİN TORREFAKSİYONU VE TORREFİYE  
PELETLERİN YANMA DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve KAYA  
152118103

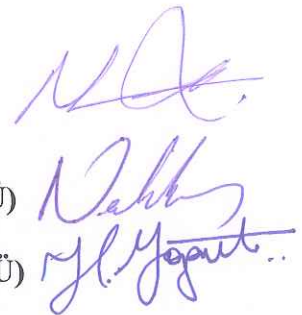
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16.07.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 05.10.2019

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Melek YILGIN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Neslihan DURANAY (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Hakan YOĞURTÇU (M.Ü)

Handwritten signatures in blue ink, including the names of the supervisors and jury members.

KASIM - 2019

## ÖNSÖZ

Danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarım boyunca bilimsel her konuda bana destek olan çalışmalarımı yakından ilgilenip, sürekli destek veren ve beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Melek YILGIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında gerekli deney düzeneğini sağlayan ve deneyimleriyle bana yol gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Dursun PEHLİHAN' a saygılarımı sunar, teşekkürü borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında benden yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Neslihan DURANAY'a teşekkür ederim.

Benden manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan eşim Fatih Mehmet Çınar'a ve yaşamım boyunca aldığım her kararında arkamda olan, bana güvenen, sevgi ve ilgilerini esirgemeyen aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Lisansüstü tez çalışmamda yüksek lisans proje kapsamında verdiği maddi destek dolayısıyla Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimine (MF.18.38 nolu proje) teşekkür ederim.

**Merve KAYA**

**Elazığ-2019**

## İÇİNDEKİLER

**Sayfa No:**

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>II</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>III</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>IX</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>XI</b>
<b>2. BİYOKÜTLE</b> .....	<b>4</b>
2.1. Biyokütlenin Tanımı.....	4
2.2. Biyokütle Enerjisi .....	5
2.3. Biyokütlenin Yapısı ( Lignoselülozik Yapı ) .....	6
2.3.1. Selüloz.....	8
2.3.2. Hemiselüloz.....	9
2.3.3. Lignin .....	10
2.4. Biyokütle Enerji Kaynakları.....	11
2.4.1. Bitkisel Kaynaklar.....	12
2.4.2. Hayvansal Kaynaklar .....	13
2.5. Biyokütle Kullanımının Avantajları .....	13
2.6. Biyokütle Kullanımının Dezavantajları.....	14
2.7. Biyokütlenin Dönüşüm Prosesleri .....	15
2.8. Türkiye’de ve Dünyada Biyokütle Potansiyeli.....	15
<b>3. TORREFAKSİYON</b> .....	<b>19</b>
3.1. Torrefaksiyon Mekanizması .....	20
3.2. Proses Aşamaları .....	21
3.3. Torrefaksiyon Mekanizmasına Etki Eden Faktörler.....	23
3.3.1 Sıcaklık.....	23
3.3.2. Reaksiyon süresi .....	24
3.3.3. Parçacık büyüklüğü.....	25
3.3.4. Reaktör tipi.....	26
3.4. Torrefaksiyonun Biyokütle Özelliklerine Etkisi .....	27

3.4.1. Görünüm .....	27
3.4.2. Öğütülebilirlik .....	27
3.4.3. Peletleme .....	28
3.4.4. Taşıma ve Depolama .....	28
3.4.5. Nem İçeriği .....	29
3.4.6. Hidrofobi .....	29
3.4.7. Enerji yoğunluğu .....	30
3.5. Torrefaksiyon İşleminin Teknik Zorlukları ve Dezavantajları .....	30
<b>4. PELETLEME .....</b>	<b>32</b>
<b>5. PELETLEME VE TORREFAKSİYONUN BİRLİKTE UYGULANMASI .....</b>	<b>35</b>
5.1. TOP Prosesi .....	36
<b>6. BİYOKÜTLENİN YANMASI .....</b>	<b>39</b>
<b>7. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>42</b>
<b>8. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>46</b>
8.1. Pelet Hazırlama .....	46
8.2. Torrefaksiyon Deneyi .....	47
8.3. Yakma Sistemi .....	48
8.4. Kayın Ağacı Odunu ve Torrefiye Ürünlerin TGA ve Elementel Analizleri .....	50
<b>9. DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>51</b>
9.1. Torrefaksiyon İşlem Şartlarının Ürün Verimine Etkisi .....	51
9.2. Katı Ürünün Karakterizasyonu .....	53
9.2.1. Katı Ürünün Kısa (Proximate) ve Elementel Analizi .....	53
9.2.2. Katı Ürünün TGA Analizi .....	56
9.3. Ham odun ve Torrefiye Peletlerin Yanma Davranışı .....	59
9.4. CO <sub>2</sub> ve NO emisyonu .....	63
9.5. NO emisyonu .....	64
<b>10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>68</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>70</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>75</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>78</b>

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **KAYIN AĞACI ODUN PELETİNİN TORREFAKSİYONU VE TORREFİYE PELETLERİN YANMA DAVRANIŞI**

Merve KAYA

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2019,

Fosil yakıtla bağımlı endüstrinin çevresel sonuçları göz önüne alındığında, yenilenebilir kaynakların kullanımı, enerji tedariki için hala önemli bir seçenektir. Bugün, dünyadaki enerji ihtiyacının sadece % 10'u biyokütle kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Bu, biyokütle enerjisine olan büyük ilgiyi göz önünde alındığında beklentilerin altındadır ve fosil yakıt kullanımı yerine daha pratik yaklaşımlar gerektirmektedir. Torrefaksiyon günümüzün enerji sistemlerine dahil edilebilecek kömür benzeri katılar elde etmek için umut verici bir tekniktir.

Bu çalışmada, kayın ağacı odun talaşından hazırlanan peletlerin torrefaksiyonu ve torrefiye peletlerin yanma davranışı incelenmiştir. Bunun için odun peletleri sabit yatak sisteminde torrefaksiyon işlemine tabi tutuldu. Ürün verimi ve katı ürünün özelliklerine, sıcaklık, işlem süresi gibi işlem parametrelerinin etkisi incelendi. Torrefaksiyon işlemi 220, 260 ve 300 °C sıcaklık ve her bir sıcaklıkta 10, 20, 40 ve 60 dakika işlem süresince gerçekleştirildi. İşlem sonunda elde edilen katı ürün sabit yatak yakma sisteminde yakılarak yanma davranışı üzerine fırın başlangıç sıcaklığının etkisi incelendi. Ayrıca torrefiye ürünün kısa, elementsel, TGA ve DTG analizleri yapıldı.

Kayın ağacı odun peletinin torrefaksiyon işlemi ile kullanılabilir bir katı yakıtla dönüştürülmesi amacıyla yürütülen çalışmada, katı ürün verimi üzerine işlem sıcaklığının işlem süresinden daha etkili olduğu sonucuna varıldı.

Katı ürünün torrefaksiyon sıcaklığı ile uçucu madde içeriğinin azaldığı ve sabit karbon içeriğinin arttığı belirlendi. İşlem sıcaklığındaki artış ile torrefiye katıların karbon içeriği artarken oksijen içeriği azaldı. TGA ve DTG analizleri hemiselülozun orta ve şiddetli torrefaksiyon sonucu elde edilen katı ürünlerde tamamen parçalandığını gösterdi.

Torrefiye peletlerin sabit yatak yakma sisteminde yanma davranışlarının incelendiği deneylerde torrefiye peletlerin tutuşma sürelerinin kısaldığı görüldü. Torrefiye peletlerin uçucu madde yanma sürelerinin torrefaksiyon sıcaklığı ve işlem süresi ile kısaldığı ve uçucu madde yanma süresi ile uçucu madde yanma hızı arasında ilişki olmadığı tespit edildi. Karbon yanma süresinin, torrefiye ürünün sabit karbon içeriği ile uzadığı görüldü. Uçucu madde yanma periyodu ile karbon yanma periyodunun fırın başlangıç sıcaklığından etkilendiği sonucuna varıldı.

Ham ve torrefiye katıların uçucu madde yanma periyodunda belirlenen CO<sub>2</sub> ve NO emisyonlarının torrefaksiyon şiddetine bağlı olarak yapıdan uçucu bileşenlerin ayrılması nedeni ile azaldığı tespit edildi.

**Anahtar kelimeler:** Torrefaksiyon, pelet, biyokütle, yakma

## **ABSTRACT**

Master Thesis

# **TORREFACTION OF BEECH WOOD PELLET AND COMBUSTION BEHAVIOR OF TORREFIED PELLETS**

Merve KAYA

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Chemical Engineering

2019,

Use of renewable sources is still a crucial option for energy supply in view of environmental consequences of fossil fuel-dependent industry. Today, only 10% of world's energy needs have been met by biomass sources. This is lower than expectations considering vast interest on biomass energy and necessitates more practical approaches to substitute fossil fuel usage. Torrefaction is a promising technique to obtain coal-like solids which can be incorporated into today's power systems.

In this study, torrefaction of pellets prepared from beech wood sawdust and combustion behavior of torrefied pellets were investigated. For this purpose, the wood pellets were subjected to torrefaction in the fixed bed system. The effect of process parameters such as temperature and processing time on product yield and solid product properties were examined. The torrefaction was carried out at 220, 260 and 300 ° C for 10, 20, 40 and 60 minutes at each temperature. The solid product obtained at the end of the process was burned in the fixed bed combustion system and the effect of the furnace initial temperature on combustion behavior was investigated. In addition, proximate, elemental, TGA and DTG analyzes of the torrefied product were performed.



In the study carried out with the aim of converting beech wood pellet into a usable solid fuel by torrefaction process, it was concluded that the procedure temperature was more effective on the solid product yield than the processing time.

It was determined that the increased procedure temperature increased fixed carbon content of the solid product and decreased the volatile content of the solid product. With the increase in the process temperature, the carbon content of torrefied solids increased while oxygen content decreased. TGA and DTG analyzes showed that hemicellulose was completely degraded in solid products obtained from moderate and severe torrefaction.

The combustion behavior of torrefied pellets in the fixed bed combustion system was investigated and it was observed that the ignition times of the torrefied pellets were shortened. It was determined that volatile combustion times of torrefied pellets were shortened with torrefaction temperature and processing time. There was no relationship between volatile combustion time and volatile combustion rate. The carbon combustion time was found to be prolonged by an increase in the fixed carbon content in the torrefied product. It was concluded that volatile combustion period and carbon combustion period were affected by the furnace initial temperature.

It was found that the CO<sub>2</sub> and NO emissions determined during the volatile combustion period of the raw and torrefied solids were reduced due to the leaving of volatile components from the structure depending on the severity of torrefaction.

**Key words:** Torrefaction, pellets, biomass, combustion

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No:

Şekil 2.1.	Fotosentez .....	5
Şekil 2.2.	Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımı.....	6
Şekil 2.3.	Bitki Hücre Primer Hücre Duvarının Yapısı .....	7
Şekil 2.4.	Biyokütlenin bileşenleri .....	7
Şekil 2.5.	Selülozun yapısı .....	9
Şekil 2.6.	Hemiselülozun kimyasal yapısı .....	10
Şekil 2.7.	Ligninin kimyasal yapısı.....	11
Şekil 2.8.	Biyokütleye uygulanan dönüşüm prosesleri, ürünler ve uygulamaları.....	15
Şekil 2.9.	2015 yılı Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları dağılımı .....	18
Şekil 3.1.	Odunun enerji yoğunluğunun torrefaksiyon ile değişimi .....	19
Şekil 3.2.	Biyokütlenin ana bileşenlerinin parçalanma sıcaklıkları .....	21
Şekil 3.3.	Torrefaksiyon işleminin aşamaları.....	22
Şekil 3.4.	Çeşitli torrefaksiyon deneylerinden elde edilen ürün verimleri.....	24
Şekil 3.5.	Biyokütlenin parçacık büyüklüğü (mm) farklı sıcaklık ve zamanda kütle ve enerji verimine etkileri .....	25
Şekil 4.1.	Pelet presi.....	33
Şekil 5.1.	Peletleme, torrefaksiyon ve TOP işleminin temel işlem yapıları. ....	37
Şekil 6.1.	Teorik alev sıcaklığının odunun nem içeriği ve fazla hava miktarına göre değişimi.....	40
Şekil 6.2.	Selülozun piroliz ve yanma reaksiyonları.....	41
Şekil 6.3.	Biyokütlenin yanma süreçleri .....	41
Şekil 8.1.	Hidrolik pres .....	46
Şekil 8.2.	Torrefaksiyon Deney Düzeneği .....	48
Şekil 8.3.	Sabit yatak yakma sistemi.....	48
Şekil 9.1.	KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak katı ürün verimi. 52	
Şekil 9.2.	KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak sıvı ürün verimi. 52	
Şekil 9.3.	KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak gaz ürün verimi . 53	
Şekil 9.4.	Farklı sıcaklıklarda 40 dk'lık işlem görmüş peletlerdeki renk değişimi. ....	53
Şekil 9.5.	Kayın ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi .....	57

<b>Şekil 9.6.</b>	Kayın ağacı odununun 220 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi .....	57
<b>Şekil 9.7.</b>	Kayın ağacı odununun 260 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi .....	58
<b>Şekil 9.8.</b>	Kayın ağacı odununun 300 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi .....	58
<b>Şekil 9.9.</b>	Kayın ağacı odunun ve 220 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri ....	59
<b>Şekil 9.10.</b>	Kayın ağacı odunun ve 260 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri ....	59
<b>Şekil 9.11.</b>	Kayın ağacı odunun ve 300 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri ....	60
<b>Şekil 9.12.</b>	Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen CO <sub>2</sub> emisyonu .....	64
<b>Şekil 9.13.</b>	Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen CO <sub>2</sub> emisyonu .....	64
<b>Şekil 9.14.</b>	Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen NO emisyonu .....	66
<b>Şekil 9.15.</b>	Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen NO emisyonu .....	67

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa No:

<b>Tablo 2.1.</b> Bazı bitkilerin lignoselülozik içerikleri .....	8
<b>Tablo 2.2.</b> Biyokütlenin mineral madde içeriği.....	8
<b>Tablo 2.3.</b> Bazı biyokütle kaynakları ve hammaddeleri.....	12
<b>Tablo 2.4.</b> Yenilenebilir enerji alanında ülkelerin yıllık yatırımları .....	17
<b>Tablo 2.5.</b> Yenilenebilir enerji kaynak bazlı enerji üretimi ve hedefler .....	18
<b>Tablo 3.1.</b> Termal Ön İşlem Yöntemlerinin Özellikleri.....	20
<b>Tablo 3.2.</b> Çam ve torrefiye çamın analizi .....	23
<b>Tablo 3.3.</b> Farklı türdeki torrefaksiyon reaktörlerin avantajları ve sınırlamaları.....	26
<b>Tablo 5.1.</b> Odun talaşı, odun peleti, torrefiye pelet, torrefiye talaş ve kömürün özellikleri .....	35
<b>Tablo 8.1.</b> Baca gazı cihazının ölçüm aralığı .....	49
<b>Tablo 9.1.</b> Kayın ağacı odunu (KAO) ve KAO'nun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye ürünlerin kısa analizi .....	54
<b>Tablo 9.2.</b> Kayın ağacı odunu (KAO) ve KAO'nun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye ürünlerin elementel analiz .....	55
<b>Tablo 9.3.</b> Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında uçucu madde yanma periyoduna ait sonuçlar .....	61
<b>Tablo 9.4.</b> Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında uçucu madde yanma periyoduna ait sonuçlar .....	61
<b>Tablo 9.5.</b> Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında karbon yanma periyoduna ait sonuçlar .....	62
<b>Tablo 9.6.</b> Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında karbon yanma periyoduna ait sonuçlar .....	63

## 1. GİRİŞ

Dünyada enerji tüketimi her yıl artmakta, fosil yakıtların kaynakları azalmakta ya da sabit kalmaktadır. Ayrıca, artan CO<sub>2</sub> emisyonları fosil yakıtların kullanımını azaltma ve atıklardan (ikinci nesil biyoyakıtlar denilen) alternatif yakıtların kullanımını genişletme ihtiyacı yaygın bir bilgi haline gelmiştir. Dahası, biyokütle, elektrik, ısı, yakıt ve kimyasal ürünler üretebilen tek yenilenebilir kaynak olup, yakın gelecekteki zorluklarla yüzleşmek için oldukça stratejik bir kaynaktır. Gelişmekte olan ekonomilerdeki atık yönetim sistemlerinin yetersiz olması nedeni ile atıkların ayrıştırılmaması hala yetersizdir ve bazı durumlarda çevre sorunlarına neden olur. Çünkü atıklar ayrıştırılmaz ve açık depolama sahalarına atılır. Biyokütle atıkları, özellikle gıda ve tarımsal sanayi sektöründen elde edilen atıklar, dünya genelinde bol miktarda bulunmaları, karbonunun nötr olması nedeniyle umut verici bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilebilir (Arenas vd., 2019).

Biyokütle, gazlaştırma, piroliz, anaerobik bozulma, fermentasyon ve transesterifikasyon gibi çeşitli yöntemlerle gaz veya sıvı yakıtlara dönüştürülebilir. Aynı zamanda ısı ve enerji üretimi için doğrudan bir katı yakıt olarak da kullanılabilir. Bununla birlikte, biyokütle toplama, öğütme, depolama ve nakliye konularındaki zorluklarının yanı sıra düşük dönüşüm verimliliği ile sonuçlanan yüksek nem içeriği, düşük kalorifik değeri, higroskopik yapısı, düşük yoğunluğu ile karakterize edilir. Bu nedenlerden dolayı, biyokütle genellikle enerji santrallerinde tek başına kullanımı yerine kömürle birlikte kullanılmıştır (Sami vd., 2001).

Sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak biyokütle, son zamanlarda hem politik hem de bilimsel açılarından daha fazla ilgi çekmiştir. Bununla birlikte, biyokütle enerji kaynaklarının kömür için kullanılan mevcut sistemlere kıyasla öğütme, besleme, depolama ve kullanım açısından özel dikkat ve daha pahalı çözümlere ihtiyacı vardır (Chen ve Kuo, 2011).

Özellikle pulverize yakma sistemlerinde, biyokütlenin boyutunun küçültülmesi, fibroz ve daha kuvvetli yapısından dolayı kömürden çok daha zordur. Biyokütle ile ilgili diğer zorluklar arasında düşük enerji yoğunluğu ve biyokütle yakıtların homojen olmaması yer almaktadır (Gil vd., 2013). Torrefaksiyon işlemi, son zamanlardaki çalışmalarda hafif piroliz olarak bilinen ve oksijensiz ortamda atmosferik basınçta düşük sıcaklıklarda biyokütlenin ısıtılması ile enerji yoğunluğunun artırılmasını

sağlayan termal bir yöntemdir. İşlem süresince biyokütle parçalanmaya başlar ve nem ile birlikte organik bileşiklerle beraber yanabilen uçucu bileşikler ayrılır. Böylece torrefiye biyokütlenin enerji yoğunluğu artar ve yapısı değiştiği için öğütmek kolaylaşır. Bu durum yakma ve peletleme işleminde boyut küçültme için gerekli enerji ihtiyacını azaltacaktır. Torrefaksiyon işlemi peletleme ile birlikte yürütülürse biyokütle yakıtların enerji yoğunluğu belirgin olarak artacak ve yakıtın taşınmasında enerji tasarrufu azalacaktır (Kohl vd., 2013).

Torrefaksiyon oksijensiz ortamda biyokütlenin kısmen parçalandığı, farklı tip uçucuların serbest kaldığı 200-300 °C sıcaklık aralığında yürütülen termokimyasal bir işlemdir. Odunsu biyokütle torrefaksiyon işleminde kullanılırsa geriye kalan katı ürün torrefiye biyokütle olarak adlandırılır. Katı ürün besleme stoğunun başlangıçtaki ağırlığının %70'ni ve başlangıçtaki enerjinin %90'nına sahip olduğundan enerji yoğunlaşması sağlanabilir. Ayrıca torrefaksiyon sırasında biyokütle hidrofobik yapı kazanmasının yanında kolay öğütülebilir özelliğine de sahip olur. Böylece artan kalori değeri, hidrofobik yapı ve daha iyi öğütülebilirlik torrefiye biyokütleyi kömürün özelliklerine yaklaştırır.

Genellikle odun talaşı formundaki biyokütle düşük hacimsel yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle taşıma ve depolama koşullarını iyileştirmek için peletleme (yoğunlaştırma) gereklidir. Böylece toz oluşumu azaltılır ve ürünün mekanik dayanımı arttırılmış olur. Torrefiye biyokütlenin yoğunlaştırılması peletleme işlemi ile yapılır.

Hem torrefaksiyon hem de pelet haline getirme aşamalarının kombinasyonu, yüksek kütle ve enerji yoğunluğu, yüksek kalori değeri, hidrofobik yapı ve daha iyi işlenebilirlik gibi kömürle benzer özelliklere sahip, enerji yoğunluğu yüksek bir biyokütle katı yakıtı olan torrefiye biyokütle peletlerine (TBP'ler) yol açar. Bu özellikler, TBP'leri özellikle kömür yakma santrallerindeki çekici bir yakıt haline getirmektedir (Nunes vd., 2014). Ancak torrefiye biyokütlenin peletlenmesinde birtakım zorlukların olduğu ve peletleme işlemi sonrası torrefaksiyonun uygulandığı peletlerin dayanımının az olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada, kayın ağacı odunundan hazırlanan peletlerin farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu incelenerek katı ürün verimi üzerine sıcaklık ve işlem süresinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca torrefiye peletlerin sabit yatak yakma sisteminde yanma davranışı incelenmiştir. Böylece büyük potansiyele sahip yenilenebilir biyokütle

atıkların özelliklerinin torrefaksiyon işlemi ile iyileştirilmesinde bir yöntem olarak dikkate alınıp alınmayacağı anlaşılabilir.



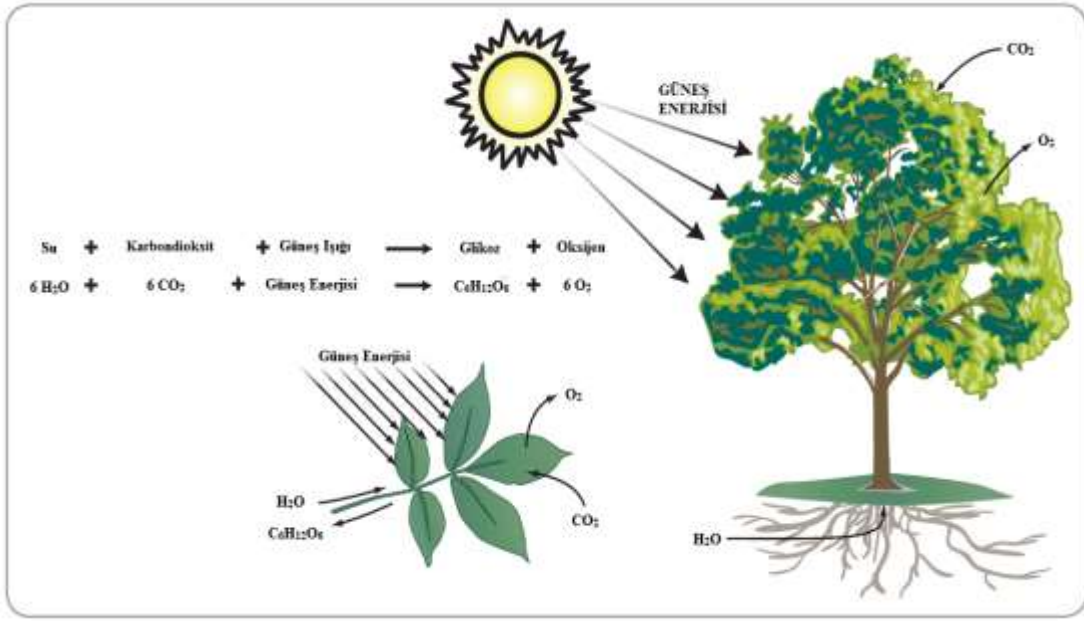
## 2. BİYOKÜTLE

### 2.1. Biyokütlenin Tanımı

Biyokütle, esas olarak karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşan herhangi bir hidrokarbon materyali olarak tanımlanabilir. Kükürt daha az oranda bulunur. Bazı biyokütle türleri aynı zamanda inorganik türlerin önemli oranlarını taşır. Bu inorganik maddelerden kaynaklanan kül konsantrasyonu yumuşak odunlarda % 1'den az, otsu ve tarımsal atıklarda % 15'e değişmektedir. Biyokütle kaynakları arasında odunsu ve otsu türler, odun atıkları, küspe, tarımsal ve endüstriyel atıklar, atık kağıt, belediye katı atıkları, talaş, biyosolütler, çimen, gıda işlemlerinden kaynaklanan atıklar, hayvan atıkları, su bitkileri ve algler gibi çeşitli doğal ve türetilmiş maddeler bulunmaktadır (Yaman, 2004).

Biyokütle, güneş enerjisinin doğrudan veya dolaylı yanma ile serbest bırakılabilen bitki ve ağaçların büyümesi sırasında fotosentez yoluyla kimyasal enerji olarak depolandığı önemli bir yenilenebilir enerji olarak bilinir. Foto kütle olarak bilinen bitkisel kaynaklı biyokütle selüloz, hemiselüloz, lignin ve az miktarda ekstraktif (terpen, tanin, yağ asidi ve reçine) ile nem ve mineral madde içeren bir kompozit malzemedir. Fotosentez, karbondioksiti doğrudan havadan yakalamak ve konsantre etmek için kullanılan doğal bir mekanizmadır. Kimyasal enerji ve organik karbon organizmalar tarafından güneş enerjisinin fotosentetik dönüşümü yoluyla doğrudan veya dolaylı olarak elde edilir. Tüm biyokütle, güneş ışığını fotosentez yoluyla bitki materyaline dönüştüren yeşil bitkiler tarafından üretilir. Fotosentez, güneş enerjisindeki enerjinin canlı bitkilerin dokularının kimyasal bağlarında yakalandığı ve depolandığı biyokütle enerjisindeki temel işlemdir. Fotosentez, karbon dioksitin elektrokimyasal indirgenmesi ile bir karbon fiksasyon reaksiyonudur. Karbondioksitin fiksasyonu veya azaltılması ışıktan bağımsız bir işlemdir. Her ne kadar fotosentezdeki adımların bazıları hala tam olarak anlaşılmasına rağmen, genel fotosentetik denklem 1800'lerden bu yana bilinmektedir. Biyokütlenin üretkenliği, gerekli miktarda güneş ışığı, su ve çeşitli besin maddelerinin varlığına ve ayrıca sıcaklık ve nem dahil uygun çevre koşullarına bağlıdır. Şekil 2.1.'de fotosentez olayı gösterilmiştir (Demirbaş, 2009).





Şekil 2.1. Fotosentez (Baumann vd., 2012)

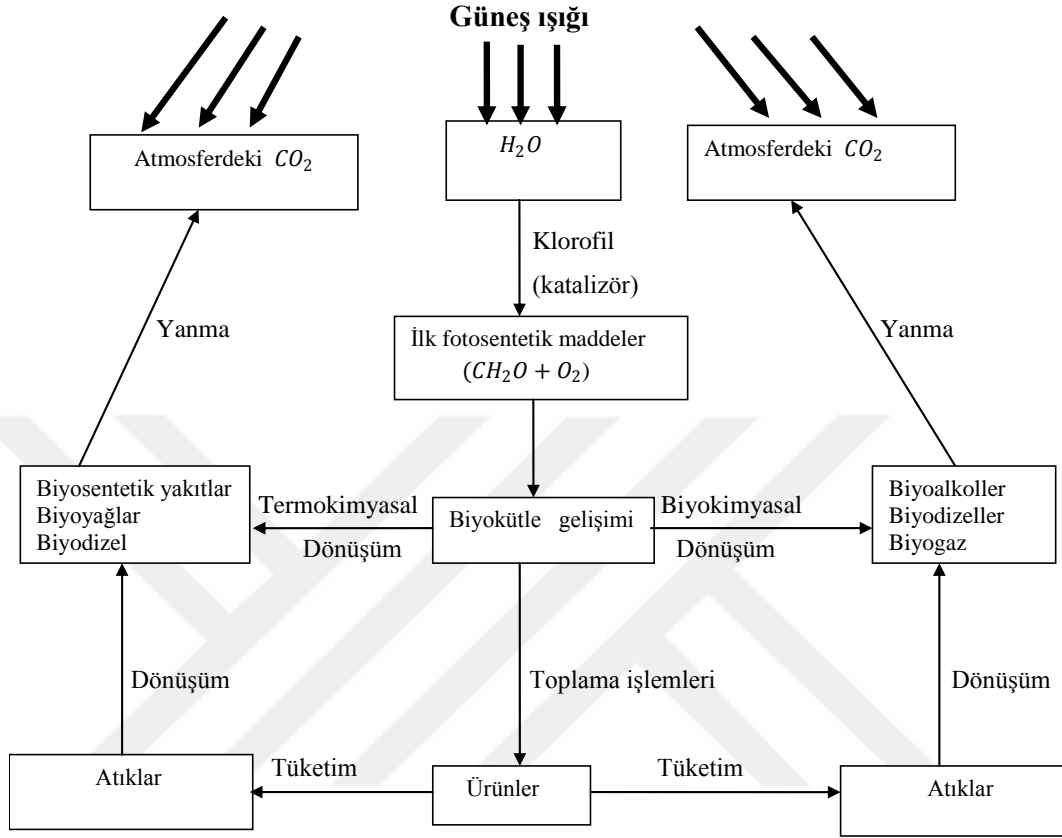
## 2.2. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle enerjisi, bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla kimyasal enerjiye dönüştürerek depolanması sonucu oluşan biyolojik kütle ve buna bağlı organik madde kaynaklarından üretilen enerji olarak tanımlanmakta ve yetiştiriciliğe dayalı olduğu için yenilenebilir, çevre dostu ve yerel bir kaynak olarak önem kazanmaktadır. Çevreyi kirlilemeyen yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında, özellikle gelişmekte olan ülkeler için uygulama alanı en geniş olanı biyokütledir.

Biyokütle yanmasından veya kömürle birlikte yakılmasından kaynaklanan biyoenerji önemli bir yenilenebilir enerjidir ve şu anda küresel birincil enerji üretiminin % 10'unu temsil etmektedir. Fosil yakıt rezervlerinin azalan rezervleri ve bunların sera gazı oluşumu, asit yağmuru ve iklim koşullarındaki değişiklikler açısından kullanımlarının olumsuz etkileri, yakıt olarak biyokütle gibi yenilenebilir enerjinin kullanılmasına ilgi duymaktadır. Dünyadaki potansiyel biyoenerji kaynakları büyük ve çeşitlidir (Valix vd, 2016).

Biyokütle yalnız yenilenebilir olması ile değil, her yerde yetiştirilebilmesi, sosyoekonomik gelişme sağlaması, çevre korumasına katkısı, elektrik üretimi, kimyasal madde ve özellikle taşıtlar için yakıt elde edilebilmesi nedeni ile stratejik bir enerji kaynağı sayılmaktadır. Dünyada petrol, kömür gibi fosil enerji kaynaklarının kısıtlı olması ve çevre kirliliği problemi dolayısıyla biyokütle, enerji probleminin çözümünde

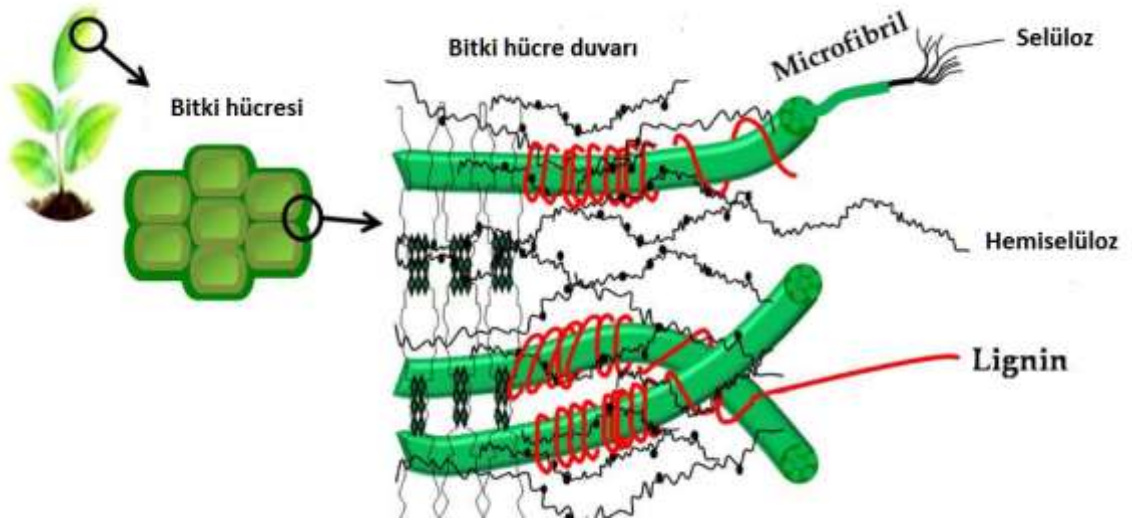
giderek önem kazanmaktadır. Şekil 2.2.'de biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Biyokütlenin enerji kaynağı olarak kullanımı (Demirbaş, 2008)

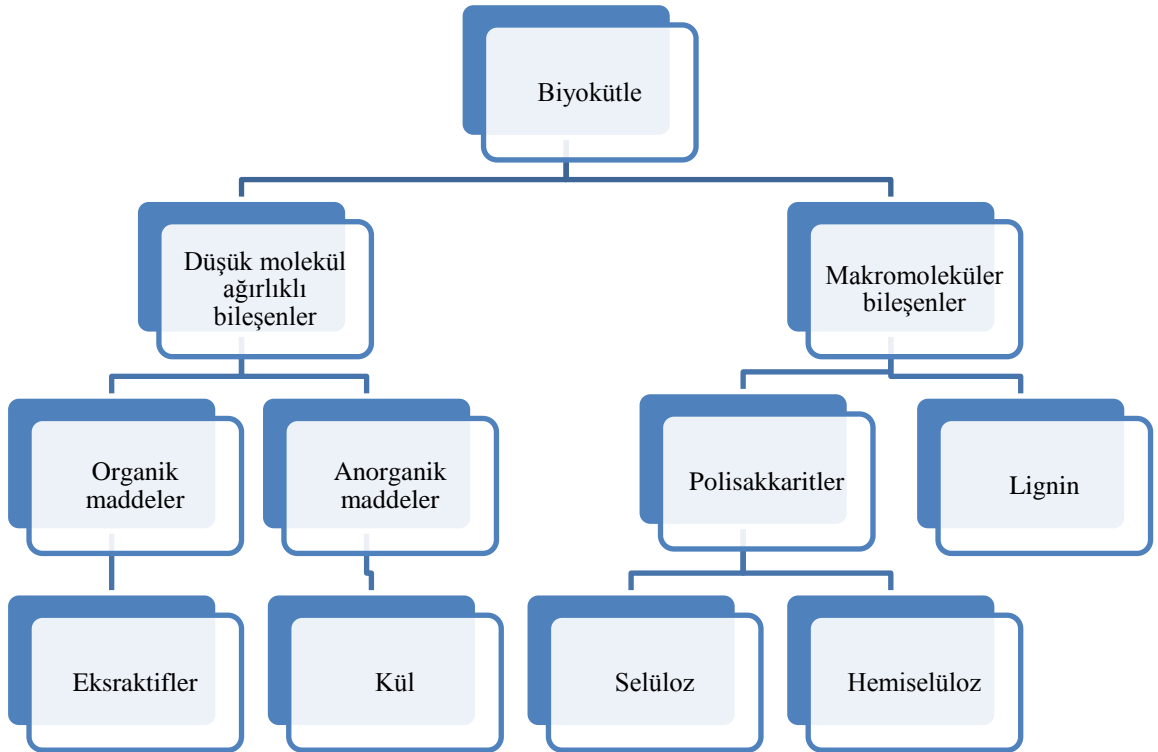
### 2.3. Biyokütlenin Yapısı ( Lignoselülozik Yapı )

Biyokütlenin kimyasal bileşimi katı fosil yakıtlardan oldukça farklıdır. Odun ve diğer biyokütle kaynakları oksijen içeren organik polimer yapılardan oluşmuştur. Biyokütleyi oluşturan temel bileşenlerden yüksek molekül kütlesine sahip karbonhidrat polimerler ve oligomerler, toplam biyokütlenin % 65-75'ini ve lignin ise % 18-35'ini oluşturmaktadır. Bunun yanında düşük molekül kütleli organik ekstraktifler ve anorganikler de biyoküttelede ağırlıkça % 4-10 arasında bulunmaktadır.



Şekil 2.3. Bitki hücre primer hücre duvarının yapısı (Tomme vd, 1995)

Biyokütlenin temel bileşenleri Şekil 2.4'te, bitki hüresinin primer hücre duvarının yapısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Selüloz, hemiselüloz ve lignin oranları biyokütlenin tipine göre farklılık göstermekle birlikte tüm biyoküteller için en temel üç ögeyi oluşturur. Bazı bitkilerin lignoselülozik içerikleri Tablo 2.1'de, mineral madde içeriği ise Tablo 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.4. Biyokütlenin bileşenleri (Mohan ve diğ. 2006)

**Tablo 2.1.** Bazı bitkilerin lignoselülozik içerikleri (Demirbaş ., 1996 )

<b>Biyokütle</b>	<b>Hemiselüloz (%)</b>	<b>Selüloz (%)</b>	<b>Lignin (%)</b>
Kayın	31,8	45,8	21,9
Çay atığı	19,9	30,2	40,0
Fındık kabuğu	29,9	25,9	42,5
Ladin ağacı	21,2	50,8	27,5
Mısır koçanı	32,0	52,0	15,0
Soya sapı	53,0	33,0	14,0
Zeytin kabuğu	23,6	33,0	48,6
Buğday sapı	39,1	28,8	18,6
Tütün yaprağı	34,4	36,3	12,1
Fıstık sapı	43,0	36,0	21,0

**Tablo 2.2.** Biyokütlenin mineral madde içeriği (Mohan vd., 2006)

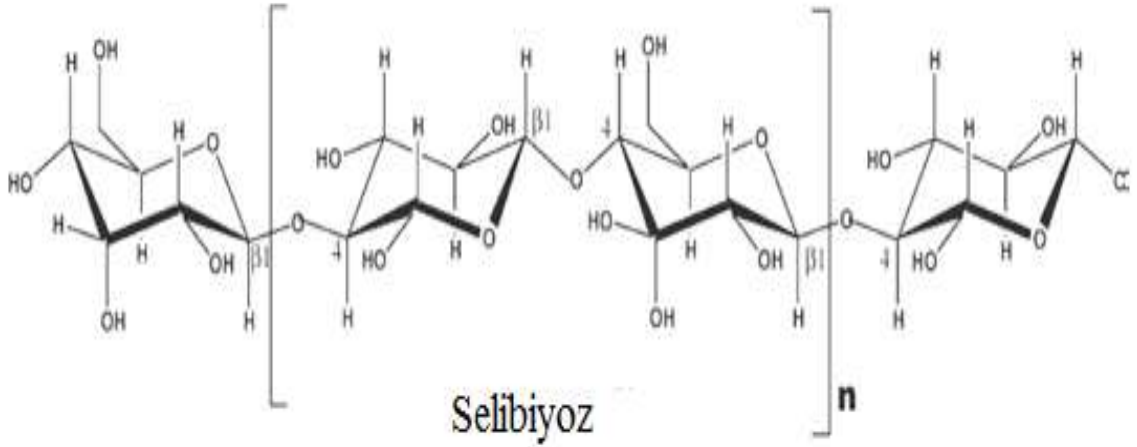
<b>Element</b>	<b>(%)</b>
K	0,1
Na	0,015
P	0,02
Ca	0,2
Mg	0,04

### 2.3.1. Selüloz

Selüloz, birçok lignoselülozik maddenin ana bileşenidir ve Dünya’da en çok bulunan organik maddelerden biridir. Bitki hücre çeperinin temel yapısını oluşturur. Hemen hemen tüm biyokütle maddelerin iskelet yapısını oluşturan selüloz, hücre duvarının

yaklaşık %50'sini oluşturur. Kapalı formülü  $(C_6H_{10}O_5)_n$  olup, "n" polimerizasyon derecesini belirtir. Ortalama molekül ağırlığı 300000-500000 arasındadır. Bir glukoz polimeri olan selüloz, çok sayıda hidroksil grubu ile diğer selüloz zincirlerine bağlanır ve sıkı bir kristal yapı oluşturur.

Çok sayıda hidrojen bağı içerdiğinden seyreltik asit ve alkali gibi alışılagelmiş çözücülerde çözünmez. Kristal yapı içinde açıkta hidroksil grubu bulunmadığı için, su yapı içerisine giremez; ancak, yapıdaki hidroksil gruplarına hidrojen köprüleri ile bağlanır ve bitişik zincirler arasına girerek onları birbirinden ayırır. Böylece hücre çeperinde daralma ve genişlemeler olur. Selüloz ancak derişik asit ve alkalide çözünür ve hidroliz ürünü glikoz oluşur. Şekil 2.5'de selülozun kimyasal yapısı gösterilmektedir.

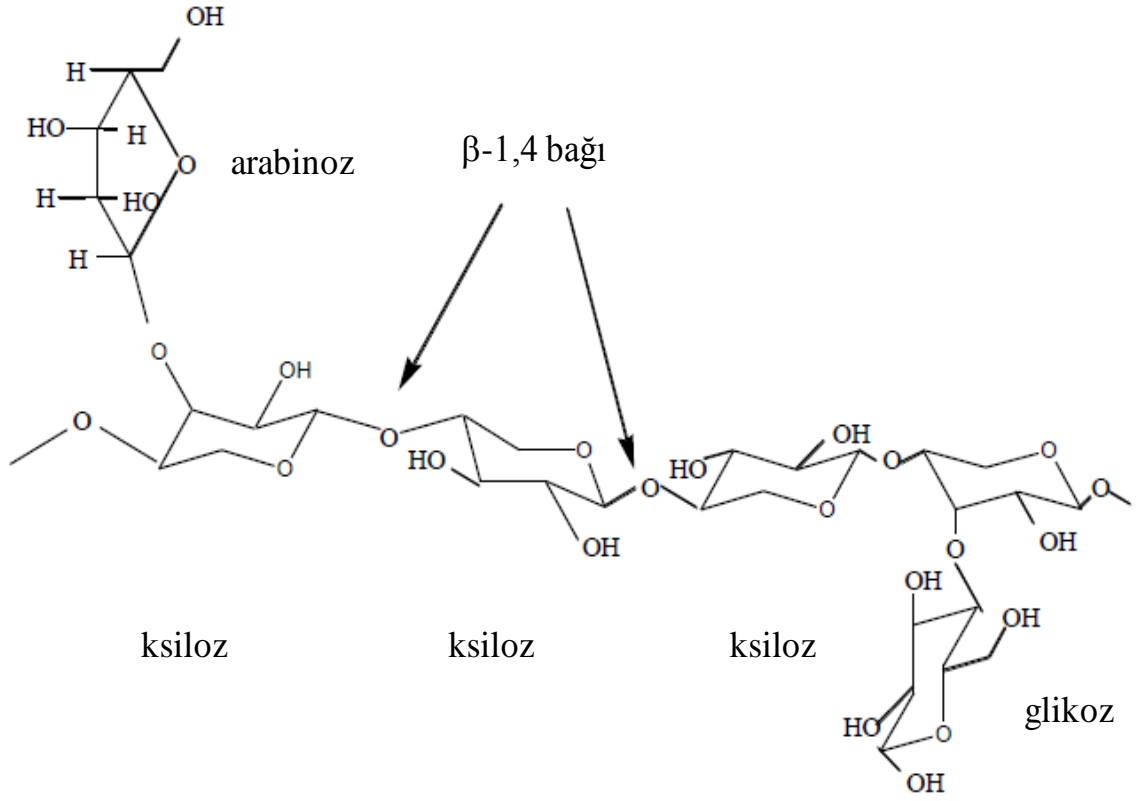


Şekil 2.5. Selülozun yapısı (Mohan vd, 2006)

### 2.3.2. Hemiselüloz

Hemiselüloz  $(C_5H_8O_4)_n$ , ksiloz, glukoz, galaktoz, arabinoz, ksilan gibi değişik polimerleşmiş monosakkaritlerin bir kompleks karışımıdır (Şekil 2.6). Rastgele ve amorf bir yapıya sahiptir ve selüloz fiberlerin yüzeyine sıkı ancak kovalent olmayan bağlarla bağlanır. Hemiselülozun yapısını çok değişik monomerik şekerler oluşturmaktadır. Polimerik yapısı, selüloza göre oldukça açık (amorf) ve düzensiz (dallanma) olmasından dolayı reaksiyonlara karşı daha duyarlıdır. Değişik konsantrasyondaki alkalin ve asidik çözeltilerde daha kolay reaksiyon vererek çözünebilir. Hemiselüloz odunsu ve otsu bitkisel materyalde miktar ve tür olarak farklı oranlarda bulunmaktadır. Genellikle kuru odun % 25- 35, yumuşak odun % 28 ve sert odun % 35 oranında hemiselüloz içermektedir.

Hemiselülozun yapısındaki karbonhidratlar glikosidik bağlardan kolayca kopabilir. Hemiselüloz kimyasal yapısında içerdiği birçok su molekülü nedeniyle, selüloza göre daha düşük yanma ısısına sahiptir.

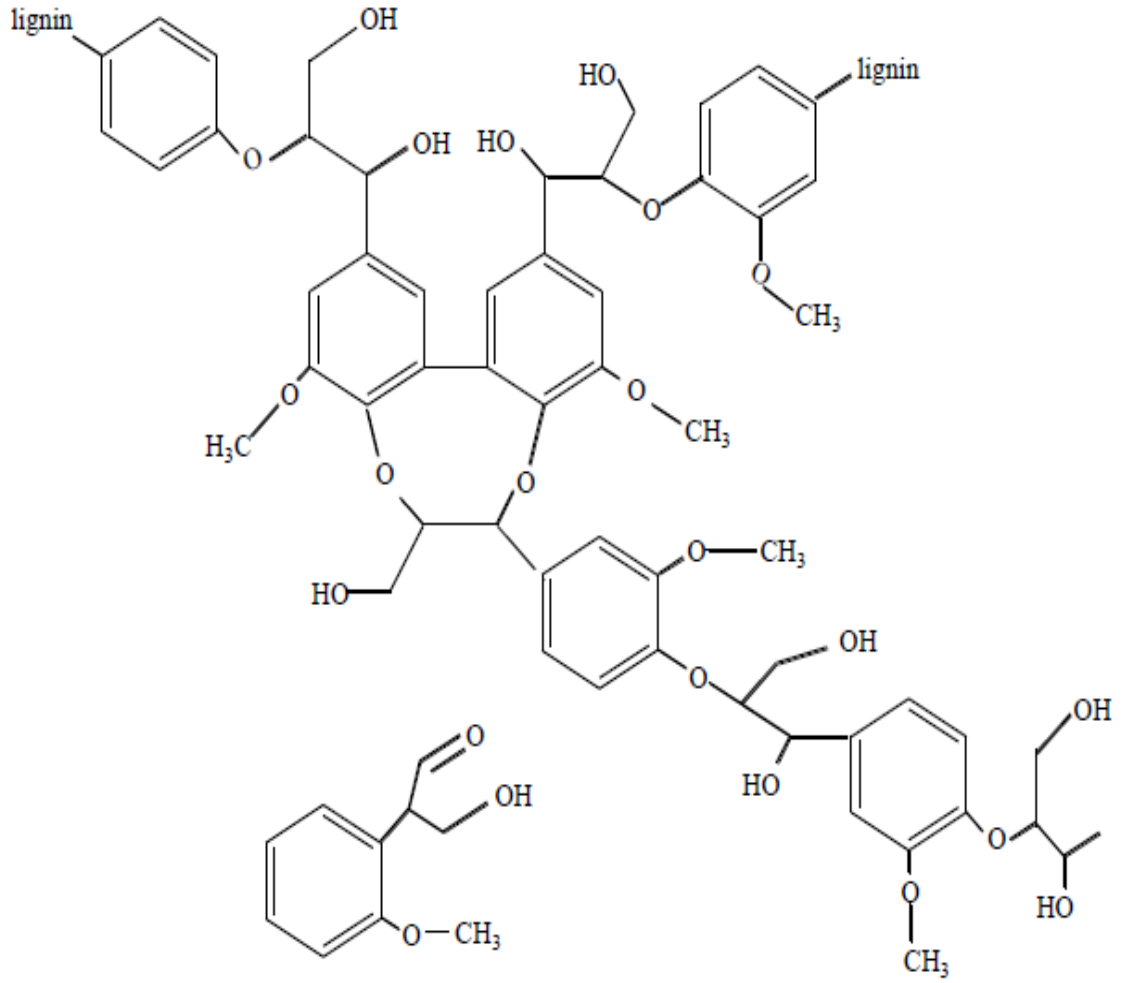


Şekil 2.6. Hemiselülozun kimyasal yapısı (Iren, 2015)

### 2.3.3. Lignin

Lignin büyük ve çok dallı yapıya sahip poliaromatik polimerdir. Bu aromatik biyopolimerin hücre çeperindeki esas görevi, yapıştırıcı özelliğinden dolayı, selüloz liflerini bir arada tutmak olarak özetlenebilir. Lignin bitkisel yapılarda yaklaşık %25-35 oranında bulunmakta, hücre duvarlarına sağlamlık vermekte; etkiye, sıkışmaya ve büzölmeye karşı çok iyi direnç sağlayan karma bir yapı oluşturup odun hücreleri arasında bir yüzey görevi görmektedir.

Lignin bir karbonhidrat olmamasına karşın doğada daha çok selüloz ve hemiselüloz ile bir arada bulunduğundan karbonhidratlar içinde incelenir. Ligninin sabit bir bileşimi yoktur ve çeşitli yapı taşlarından oluşmaktadır. Temel yapı taşı fenil propan bileşikleridir. Ligninin kimyasal yapısı Şekil 2.7'de görölmektedir.



Şekil 2.7. Ligninin kimyasal yapısı (Iren, 2015)

#### 2.4. Biyokütle Enerji Kaynakları

Biyokütle, bitkilerden, hayvanlardan ve mikroorganizmalardan kaynaklanan, fosilleşmemiş ve biyolojik olarak parçalanabilen organik maddeyi ifade eder. Bunlar arasında orman ürünleri atıkları, tarımsal artıklar, belediye katı atıklarının organik fraksiyonları, kağıt, karton, plastik, gıda atıkları, yeşil atık ve diğer atıklar sayılabilir. Çoğu plastik gibi biyolojik olarak parçalanamayan organik hammaddeler, biyokimyasal işlemlerle dönüştürülemez. Biyo bazlı malzemeler, biyokütlenin yapısını açmak için kimyasal, fiziksel veya biyolojik yollarla ön işlem yapılmasını gerektirir. Biyokütle hammaddesinin ana kategorileri Tablo 2.3'te verilmektedir.

**Tablo 2.3.** Bazı biyokütle kaynakları ve hammaddeleri

<b>Biyokütle Kaynakları</b>	<b>Hammadde</b>
Orman ürünleri	Odun, tomruk artıkları, ağaçlar, çalılar ve odun artıkları, talaş, ağaç kabuğu vb.
Biyolojik olarak yenilenebilir atıklar	Tarımsal atıklar, mahsul artıkları, öğütülmüş odun atıkları, kentsel odun
Enerji bitkileri	Kısa rotasyonlu odunsu ürünler, otsu odunsu ürünler, otlar
Su bitkileri	Yosun, su otu, su sümbülü, saz
Besin bitkileri	Tahıllar, yağ bitkileri
Şeker bitkileri	Şeker kamışı, şeker pancarı, pekmez, sorgum
Organik atıklar	Belediye katı atıkları, endüstriyel organik atıklar, belediye atık suları
Algler	Prokaryotik algler, ökaryotik algler, yosunlar

#### **2.4.1. Bitkisel Kaynaklar**

Odun biyokütlesi, ticari yapıya sahip ağaçları ve geleneksel orman ürünleri endüstrisinde kullanılmayan orman kalıntılarını içerir. Mevcut orman kalıntıları çekici bir yakıt kaynağı gibi görünebilir. Orman kalıntıları tipik olarak, ağaç tepeleri, dallar, küçük çaplı odunlar, kütükler ve ölü odun gibi ağaç kesimlerinin yanı sıra düşük değerli türler anlamına gelir. Tarımsal kalıntılar, otlar, algler, yosunlar, likenler ve yosunlar da dünyadaki önemli biyokütle hammaddeleridir. Algler, yeterli güneş ışığının olduğu her yerde pratik olarak büyüyebilir. Lignoselülozik çok yıllık mahsuller (örneğin kısa rotasyonlu odunlar ve çimler), yüksek verim, düşük maliyet, düşük kaliteli arazi için iyi uygunluk (enerji bitkileri için daha kolay bulunur) ve düşük çevresel etkiler nedeniyle ümit verici bir besleme stoğudur.

"Enerji mahsulü" terimi, hem düşük girdiler için hektar başına sadece yüksek miktarda biyokütle çıktısı sağlayan biyokütle mahsulleri hem de fermantasyon yoluyla biyoetanol için şeker veya nişasta gibi başka biyoyakıtlara dönüştürülebilen belirli



ürünler sağlayıcılar için kullanılabilir. Kısa rotasyonlu odunsu ürünler, otsu odunsu ürünler, otlar, nişasta ürünleri, şeker bitkileri, yem bitkileri, yağlı tohum bitkileri, şalterler ve miscanthus gibi enerji bitkileri, termokimyasal ve biyokimyasal dönüşüm işlemleriyle sıvı biyoyakıtlara dönüştürülebilir (Demirbaş, 2009 ).

#### **2.4.2. Hayvansal Kaynaklar**

Biyokütle yatırımı yapılabilecek bir diğer alanda hayvansal atıklardır. Bölgede üretilen bitkisel ürünlerden buğday, şeker pancarı, yağlı tohumlar ve arpa biyogaz üretiminde diğer atıklarla belirli oranlarla karıştırılarak biyogaz üretiminde kullanılabilir.

Hayvansal atıklardan elde edilecek biyogazın birçok avantajı bulunmaktadır. Biyogaz sistemlerinde organik katı maddenin yaklaşık % 50'si giderilmektedir. Bu oran bazı sistemlerde % 80-90'a kadar çıkabilmektedir.

#### **2.5. Biyokütle Kullanımının Avantajları**

Artan enerji talebi ve ortaya çıkan çevresel sorunlarla birlikte, küresel ısınma ve iklim değişikliğinden kaynaklanan olası zararları önlemek için yeni ve temiz enerji kaynakları araştırılmaktadır. Biyokütle, dünya çapında yaygın olarak dağılmıştır ve genellikle nispeten düşük bir fiyata temin edilebilir. Bu nedenle, dünyanın önemli yenilenebilir enerji kaynağı olabilir. Biyokütle, dünyanın enerji bağımsızlığını potansiyel olarak artırabilecek kimyasallar ve enerji ürünleri için sürdürülebilir bir hammaddedir. Son derece üretken, yenilenebilir, depolaması ve nakliyesi kolay olan bir enerji kaynağı olarak, biyokütle son zamanlarda dünya genelinde dikkat çekmiştir. Biyokütle, yakıtın yüksek uçuculuğu ve hem yakıt hem de sonuçtaki kömürün yüksek reaktivitesi nedeniyle yanma besleme stoğu olarak önemli avantajlar sunar.

Fosil yakıtların artmakta olan kullanımı, çevre bilincinin artmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların yaygın olarak kullanılması, sera gazı salınımının artmasına neden olur ve iklim değişikliği konusunda endişe yaratır ve bu da sera gazı etkisinin seviyesini düşürmek için teşviklerin kullanılmasına neden olmuştur. Şu anda, dünya fosil yakıt bağımlılığını azaltmakta zorlanmaktadır, bu nedenle gelişmiş endüstrileri sürdürülebilir kalkınmaları için temiz enerji yöntemleri aramaya teşvik etmektedir. Biyokütlenin sürdürülebilir karbon taşıyıcı olarak yenilenebilir tek kaynak olarak benzersiz konumu,

biyokütleyi cazip bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Biyokütle uygulamasıyla açığa çıkan CO<sub>2</sub>, fotosentez sırasında biyokütle kaynağında depolanır ve atmosferden ekstrakte edilir, bu da iklim açısından nötr bir CO<sub>2</sub> karbon döngüsü anlamına gelir (Nhuchhen vd., 2014).

## **2.6. Biyokütle Kullanımının Dezavantajları**

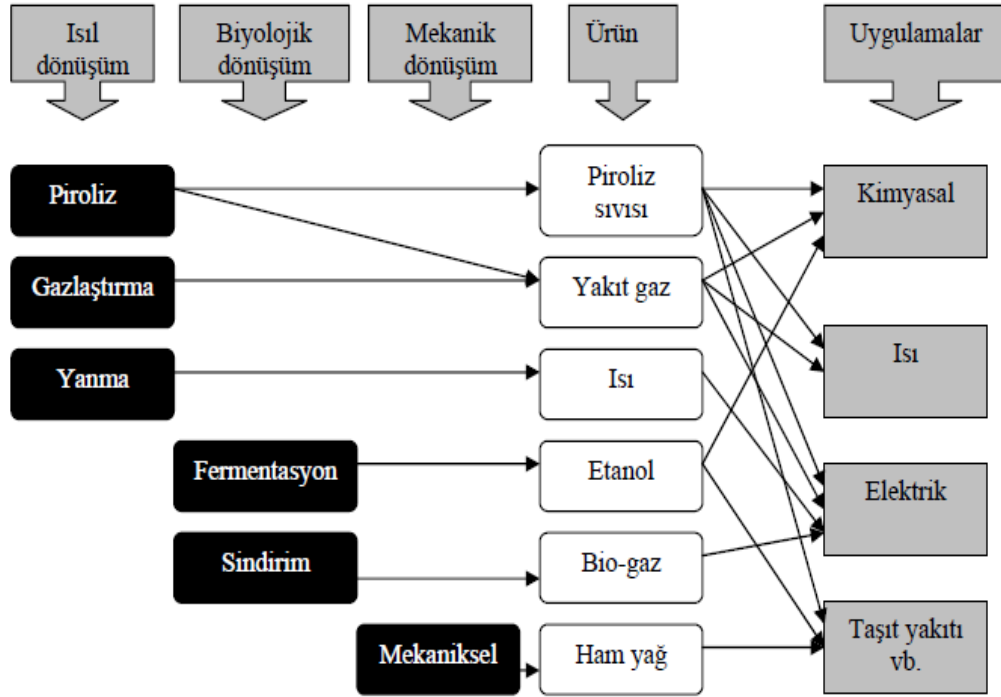
Tüm avantajlarına rağmen, biyokütlenin, bir enerji kaynağı olarak geniş ölçekte kullanımında sık sık zorluk çeken bazı eksiklikleri vardır. Kömür gibi diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında, biyokütle daha yüksek oksijen içeriğine, daha düşük kalorifik değere, daha düşük kütle yoğunluğuna, daha yüksek higroskopik yapıya ve daha yüksek nem içeriğine sahiptir. Bu nedenle, biyokütle enerji dönüşüm sistemlerinde bazı teknik zorluklarla karşı karşıyadır. Ham biyokütlenin düşük kütle yoğunluğu depolama ve işleme problemlerine neden olur.

Biyokütlenin düşük kütle yoğunluğu aynı zamanda dönüşüm tesisinde malzemelerin depolanması, taşınması ve işlenmesi ile ilgili maliyeti de artırır. Daha yüksek oksijen içeriği, ısıtma değerini düşürür ve böylece daha düşük dereceli bir yakıt haline getirir. Yüksek oksijen içeriği, yanma sırasında çok daha büyük boyutta bitki ve yardımcı ekipman gerektiren baca gazı hacminin üretilmesinden sorumludur. Ham biyokütlenin yüksek nem içeriği (% 45-60) biyoenerji üretimi ve tüketim zinciri üzerinde önemli olumsuz etkiye sahiptir. Nem, biyolojik dönüşüm yöntemlerinde bazı yararlar sağlamasına rağmen, termokimyasal dönüşümün önündeki en büyük engellerden biri olarak kalmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, mütevazı bir miktarda nem, nemden üretilen buharın, üretici gazdaki hidrojen konsantrasyonunu arttırmada yardımcı olduğu gazlaştırma işleminde bazı faydalar göstermektedir. Aynı zamanda, daha yüksek nem, genel gazlaştırma sıcaklığını da düşürür, bu da daha düşük gazlaştırma verimliliği ve daha yüksek katran oluşumu ile sonuçlanır. Öte yandan, nemli biyokütle, doğal ayrışmaya maruz kalma eğiliminin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri değiştirir ve yakıt kalitesini düşürür. Islak bir biyokütle, depolandığında, mikrobiyal bozunma işleminden dolayı bazı katı kütlelerini kaybedebilir (Nhuchhen vd., 2014).

## 2.7. Biyokütlenin Dönüşüm Prosesleri

Biyokütlenin, enerjiye dönüşümünde katı, sıvı ve gaz yakıtlar elde etmek için çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Biyoetanol, biyogaz, biyodizel gibi yakıtların yanı sıra; hidrojen, metan ve odun briketi gibi birçok yakıt türü sayılabilir. Biyokütle termal, biyolojik, mekanik ve fiziksel yöntemlerle enerjiye dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm prosesleri Şekil 2.8’de özetlenmiştir.

Dönüşüm süreçlerini özellikle biyokütlenin miktarı ve türü, istenilen enerji şekli, çevresel standartlar, ekonomik koşullar ve uygulanan projenin özellikleri etkilemektedir. Pek çok durumda istenen enerji şeklini öncelikle uygulanan süreç ve ardından seçilen biyokütlenin türü ve miktarı belirlemektedir. Biyokütle üç ana ürüne dönüştürülebilir. Bunlar; güç/ısı üretimi, yakıt ve yararlı kimyasallardır (Bridgwater, 2006).



Şekil 2.8. Biyokütleye uygulanan dönüşüm prosesleri, ürünler ve uygulamaları (Bridgwater, 2006).

## 2.8. Türkiye’de ve Dünyada Biyokütle Potansiyeli

Dünyadaki nüfus artışı ve gelişen teknolojiyle beraber enerjiye olan gereksinim günden güne artmaktadır. Son yıllarda dünya enerji gündeminde ağırlıklı bir yer işgal eden belli başlı konular olarak enerji verimliliği, alternatif yakıt seçeneklerinin

uygulanabilirliği, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji kullanımının yol açtığı çevre sorunları için aranan ve üretilen çözümler sayılabilir.

ETKB 2010-2014 stratejik planına göre enerjide dışa bağımlılığın ve % 73 seviyesinde olan ithalat bağımlılığının azaltılması amacıyla, uzun dönem plan çalışmalarında 2023 yılına kadar tüm yerli enerji kaynaklarının kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarından olabildiğince faydalanılması, kömür, doğalgaz ve hidrolik kaynaklar yanında elektrik enerjisi üretim arzının çeşitlendirilmesi amaçlanmıştır. 2023 yılı itibarıyla, toplam elektrik enerjisi arzı içerisindeki yenilenebilir enerji kaynaklı enerji üretiminin %30 seviyesinde olması temel hedeftir. Hem maliyetlerin azalması hem de dünya genelinde yenilenebilir enerji paylarının artırılması zorunluluğu nedeniyle, enerji üretim planlamalarında artık bu enerji kaynaklarının da kullanılmasını gerektirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biyogaz (çöp gazı dâhil), dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır. Biokütle enerjisi ülkemiz için önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. AB'nin yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 6'sı biokütleden sağlanmakta olup biokütle enerji kullanımı yıllık 45 MTEP'dir.

Biokütle, dünyada dördüncü en büyük enerji kaynağını oluşturması yönüyle önemli bir enerji kaynağı konumundadır. Birçok gelişmiş ülke biyoenerjiyi geleceğin temel enerji kaynağı olarak görmektedir. Örneğin; İsveç enerjisinin % 16'sı gibi büyük bir kısmını biokütleden elde etmektedir. Benzer şekilde Avusturya enerjisinin % 13'ünü biokütleden sağlarken, Finlandiya da biokütle enerjisinden önemli ölçüde yararlanmaktadır. Önümüzdeki yıllarda bu teknolojilerde yeni gelişmelerin yanında, yalnız biyokütle kaynağıyla çalışan büyük termik santrallerin yapımı planlanmaktadır. İsveç ve Finlandiya gibi ülkelerde bölgesel biyokütle santralleri ile elektrik üretimi yapılmakta olup yeni santrallerin yapımı sürmektedir.

Dünya genelinde yenilenebilir enerjiye olan yatırımlar incelendiğinde 2015 yılı itibarıyla Çin'in bu yatırımlarda başı çektiği görülmektedir. Çin'i ABD, Japonya, Birleşik Krallık ve Hindistan takip etmektedir. Tablo 2.4'te yenilenebilir enerji alanında ülkelerin yıllık yatırımları gösterilmiştir ( Kapluhan, 2014).

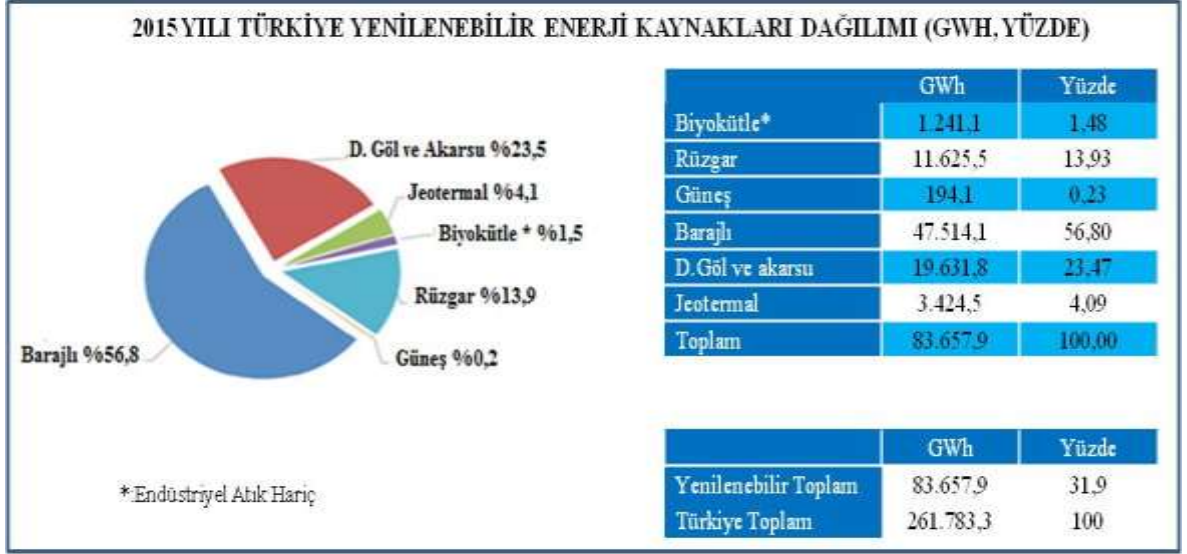
Türkiye'de özellikle 2009 yılından sonra yenilenebilir enerji konusunda önemli gelişmeler kaydedildiği görülmektedir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji üretimindeki toplam kurulu güç kapasitesi 2009 yılında 15,5 GW iken 2015 yılı itibarıyla bu rakam 31,7 GW seviyelerine getirilerek bu alanda gözle görülür bir ilerleme yaşanmıştır. 2016

yılsonu itibarıyla ise Türkiye'nin yenilenebilir enerji toplam kurulu gücü 34,2 GW olarak kayıtlara geçmiştir.

Türkiye'de yenilenebilir enerji alanında yapılan yatırımlar bir önceki yıla oranla yüzde 46 oranında artarak 2015 yılında 1,9 milyar dolara yükselmiştir. Türkiye bu yatırımlarla yenilenebilir enerji alanında İngiltere, Fransa ve Hollanda ile birlikte 1 milyar dolar eşliğini aşan dört Avrupa ülkesinden biri olmuştur. Buradan hareketle Türkiye'nin özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji alanında çok önemli ilerlemeler kaydettiği söylenebilir.

**Tablo 2.4.** Yenilenebilir enerji alanında ülkelerin yıllık yatırımları (Karagöl ve Kavaz, 2017 )

<b>YENİLENEBİLİR ENERJİ ALANINDA YILLIK YATIRIM, NET KAPASİTE ARTIRIMI VE BİYİYAKIT ÜRETİMİNDE DÜNYADA İLK BEŞ ÜLKE</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Yenilenebilir Enerji ve Yakıtlara olan Yatırım	Çin	ABD	Japonya	Birleşik Krallık	Hindistan
Yenilenebilir Enerji ve Yakıtlara olan Birim GSYİH Başına Yatırımı	Moritanya	Honduras	Uruguay	Fas	Jamaika
Jeotermal Enerji Kapasite Artışı	Türkiye	ABD	Meksika	Kenya	Almanya/Japonya
Hidrolik Enerji Kapasite Artışı	Çin	Brezilya	Türkiye	Hindistan	Vietnam
Güneş Fotovoltaik Sistem Kapasite Artışı	Çin	Japonya	ABD	Birleşik Krallık	Hindistan
Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi Sistemleri Kapasite Artışı	Fas	Güney Afrika	ABD	-	-
Güneş kolektörü Kapasite Artışı	Çin	Türkiye	Brezilya	Hindistan	ABD
Rüzgar Enerjisi Kapasite Artışı	Çin	ABD	Almanya	Brezilya	Hindistan
Biyodizel Üretimi	ABD	Brezilya	Almanya	Arjantin	Fransa
Etanol yakıt Üretimi	ABD	Brezilya	Çin	Kanada	Tayland



**Şekil 2.9.** 2015 yılı Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları dağılımı (Karagöl ve Kavaz, 2017)

Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynak bazlı enerji üretimi ve hedefleri Tablo 2.5'de verilmiştir. Şekil 2.9.'da 2015 yılı Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları dağılımı gösterilmiştir. Türkiye'de önümüzdeki dönem için yenilenebilir enerji politika ve stratejileri başlıca şu şekilde sıralanabilir:

- Fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve buna bağlı riskleri azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji üretim ve tüketimini teşvik etmek
- Yenilenebilir enerji kaynakları (hidroelektrik dahil) ile elektrik üretiminin payını en az yüzde 30 seviyelerinde tutmak
- Tarım sektörü potansiyellerinden daha fazla faydalanılarak biyoyakıt enerjisi kullanımını artırmak
- Mevcut yenilenebilir enerji kaynakları ile yapılan üretim miktarlarını artırmak (Karagöl ve Kavaz,2017).

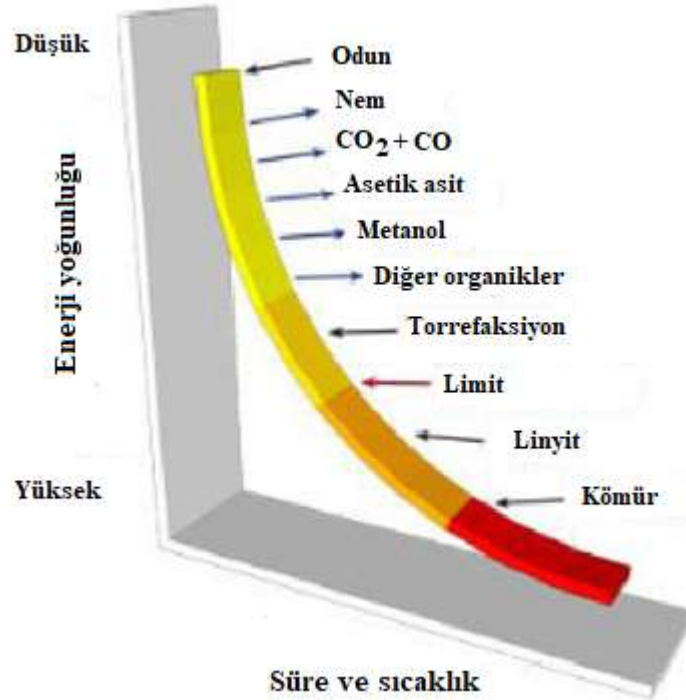
**Tablo 2.5.** Yenilenebilir enerji kaynak bazlı enerji üretimi ve hedefler (Karagöl ve Kavaz, 2017)

<b>YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAK BAZLI ENERJİ ÜRETİMİ VE HEDEFLER (MW)</b>				
Yenilenebilir Eneji Kaynağı	2015	2017	2019	2023
Hidroelektrik	25.526	28.763	32.000	34.000
Rüzgar	5.660	9.549	13.308	20.000
Güneş	300	1.800	3.000	5.000
Jeotermal	412	559	706	1.000
Biyokütle	377	530	683	1.000

### 3. TORREFAKSİYON

Torrefaksiyon işlemi, reaktif hemiselüloz fraksiyonunun ayrıştırılmasıyla artan enerji yoğunluğuna sahip bir yakıt üretmeyi amaçlayan biyokütleden oksijenin uzaklaştırılmasına dayanır. Sıcaklık, inert gaz, reaksiyon süresi ve biyokütle kaynakları gibi farklı reaksiyon koşulları çeşitli katı, sıvı ve gaz ürünlere yol açar.

Torrefaksiyon ılımlı bir piroliz işlemidir. Genel olarak reaksiyon sıcaklığı 200 °C ila 300 °C arasındadır. Ayrıca, torrefaksiyonun ısıtma hızı genellikle 50 °C / dk'nın altındadır, çünkü daha yüksek ısıtma hızı daha kısa işlem süresine neden olabilir. Yeterince uzun süre eksik reaksiyonla sonuçlanacaktır. Biyokütlenin torrefaksiyonunun amaçları nemi ve hafif organik bileşikleri uzaklaştırmak, uzun polisakarit zincirlerini depolimerize etmek, yüksek enerji yoğunluğuna sahip (Şekil 3.1) öğütülebilirliği kolay hidrofobik bir yakıt üretmektir. Bu işlemle depolama ve nakliye maliyetleri azaltılabilir Torrefaksiyon biyokütle, ev veya endüstri kullanımları için katı bir yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca toz haline getirilmiş kömür yakıtlı kazanlarda kömürle birlikte de kullanılabilir Kuru ve ıslak torrefaksiyon yönteminin özellikleri Tablo 3.1'de özetlenmiştir (Huang vd., 2012).



Şekil 3.1. Odunun enerji yoğunluğunun torrefaksiyon ile değişimi (Pourmakhdomi, 2014)

**Tablo 3.1.** Termal Ön İşlem Yöntemlerinin Özellikleri (Yan vd., 2009)

Termal Ön İşlem Yöntemleri	Özellikleri
Islak Torrefaksiyon	.Sıcaklık aralığı : 200-260 °C .Ortam : Sıcak basınçlı su .Basınç aralığı:200-700 psi .Biyokütle örneklerin büyüklüğü:2 g .Kalma süresi : 5 dk .Soğutma işlemi: Hızlı şekilde daldırma buz banyosu .Filtrasyon ve buharlaşma süreci gerekir. .Kuru torrefaksiyondan daha yüksek enerji yoğunluğu.
Kuru Torrefaksiyon	Sıcaklık aralığı : 250-300 °C .Ortam : İnert gaz (Azot) .Basınç aralığı:Atmosferik basınç .Biyokütle örneklerin büyüklüğü:5 g .Kalma süresi : 80 dk .Soğutma işlemi: Azot akışı/su ile soğutma

### 3.1. Torrefaksiyon Mekanizması

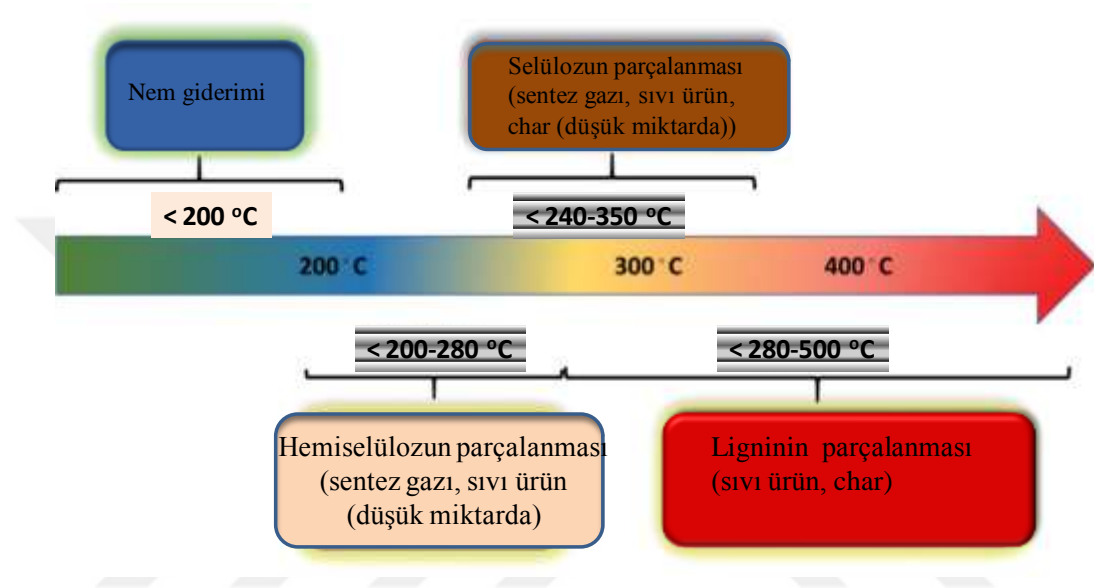
Torrefaksiyon mekanizması, üç ana biyokütle bileşeninden birinin, yani hemiselülozun reaktivitesine dayanmaktadır. Diğer iki bileşen selüloz ve lignin 200 °C ila 300 °C sıcaklık aralığında daha az reaktiftir.

Biyokütlenin torrefaksiyonu nemin buharlaşması, hemiselülozun ayrışması, ligninin ayrışması ve selülozun ayrışması şeklinde dört aşamaya ayrılabilir. Biyokütlenin uçucu bileşeni (%80) ve karbon miktarı (%20 sabit karbon ve kül) termokimyasal dönüşüm işleminde ana adımı oluşturur. Biyokütlenin torrefaksiyonu birkaç reaksiyonu içerir, bu da onu karmaşık bir mekanizma yapar. Biyokütlenin ayrışması aslında aynı zamanda gerçekleşen bir reaksiyon dizisidir ve kinetik modellerle iyi şekilde tanımlanabilir. Üç ana bileşen olan selüloz, hemiselüloz ve ligninin torrefaksiyonunun bilinmesi, torrefaksiyon işleminin temelini anlamak için önemlidir. Sıcaklık 200°C'ye yükseltirse hemiselüloz sınırlı miktarda uçucu bileşenlere ayrışır ve karbonizasyona başlar (biyokütle kahverengileşmeye başlar). 250°C -260°C civarında bir sıcaklığa ulaşıldığında yoğun uçucu madde çıkışı meydana gelir. Bu sıcaklık aralığında ayrıca



lignin ve selüloz hafifçe parçalanır ve bu da önemli bir kütle kaybına yol açmaz. Şekil 3.2.'de biyokütlenin ana bileşenlerinin parçalanma sıcaklıkları gösterilmiştir.

Hafif torrefaksiyon 240 °C' nin altında meydana gelmektedir ve selüloz ve ligninin sadece hafif bir şekilde etkilendiği halde, önemli bir hemiselüloz ayrışması ile karakterize edilmektedir. 270 °C'nin üzerinde şiddetli bir torrefaksiyon meydana gelir ve selüloz ve lignin üzerinde gözle görülür bir etki ile karakterize edilir.



Şekil 3.2. Biyokütlenin ana bileşenlerinin parçalanma sıcaklıkları

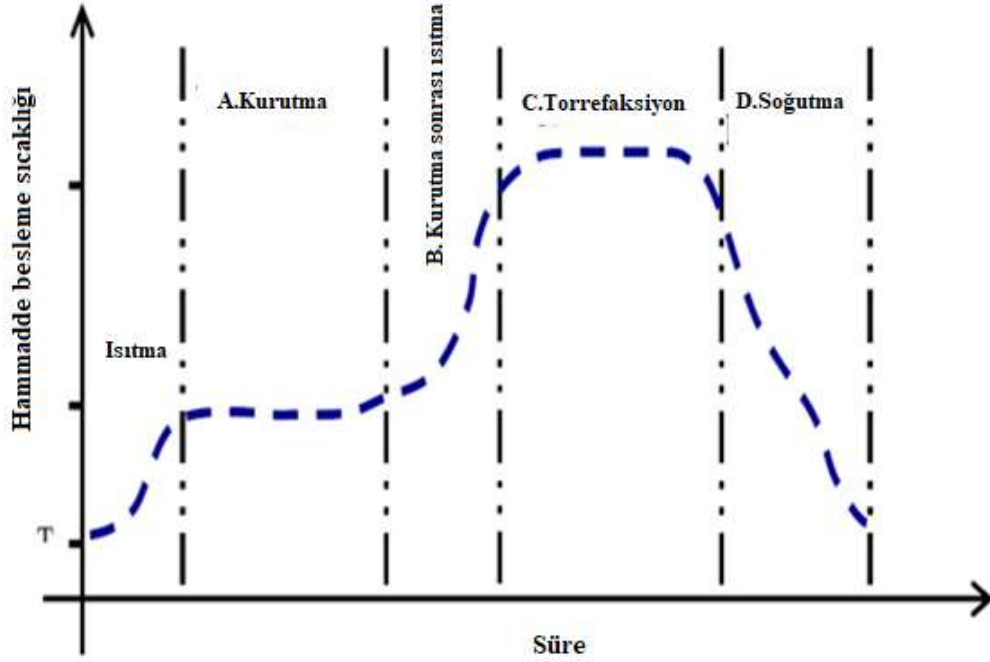
### 3.2. Proses Aşamaları

Genel torrefaksiyon işlemi, Bergman ve arkadaşları tarafından önerildiği gibi sıcaklık-zaman profiline göre beş aşamaya ayrılır (Şekil 3.3).

- Aşama 1, biyokütle sıcaklığının 100 °C'ye ulaşması ve suyun buharlaşmaya başlayana kadar yükseldiği ilk ısıtma aşamasıdır. İlk ısıtma aşamasında, biyokütlenin nem içeriğinin buharlaşması çok yavaş olmasına karşın biyokütlenin sıcaklığı artar.
- Biyokütle sıcaklığı, aşama 2 boyunca tüm serbest su buharlaşana kadar önemli ölçüde değişmez. Bu, ön kurutma aşamasıdır.
- Aşama 3, 100-200 °C arasında meydana gelen kurutma sonrası ve ara ısıtma aşamasına karşılık gelir. Bu aşamada fiziksel olarak bağlı su serbest kalır. Aynı

zamanda hafif organik fraksiyonların buharlaşmasından dolayı bir miktar kuru madde kaybı meydana gelir.

- Aşama 4 veya ayrışma reaksiyonunun gerçekleştiği torrefaksiyon aşaması, biyokütle sıcaklığı 200 °C'ye ulaştığında başlar. Torrefaksiyon işleminin sonunda, sıcaklık maksimum torrefaksiyon sıcaklığının altına düştüğünde çok sınırlı bir kütle kaybı meydana gelse de, sıcaklığın 200 °C'nin altına düştüğü an olarak kabul edilir. Torrefaksiyon reaksiyonunun sıcaklığı, maksimum biyokütle sıcaklığı olarak tanımlanır.
- Aşama 4, tüm süreç boyunca en büyük kuru madde kaybından sorumludur.
- 5. aşamada, işlem görmüş katının oda sıcaklığına kadar soğutulması gerçekleşir.



Şekil 3.3. Torrefaksiyon işleminin aşamaları (Nhuchhen vd., 2014)

Şekil 3.3.'te görülebileceği gibi, kurutma sırasında sıcaklık değişmeden kalır ve kurutma sırasında kullanılan enerjinin en yüksek ve torrefaksiyon sırasında daha düşük olduğu önemli bir ayrımdır. Torrefaksiyon sadece 200 °C'nin üzerinde başladığında, kalma süresi olarak bilinen torrefaksiyon süresi genellikle biyokütle sıcaklığı bu sıcaklığı aştığı andan itibaren ölçülür (Nhuchhen vd., 2014).

### 3.3. Torrefaksiyon Mekanizmasına Etki Eden Faktörler

#### 3.3.1 Sıcaklık

Sıcaklık, torrefaksiyonun ürün kalitesi üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Torrefaksiyon ürününün katı verimi sıcaklığa bağlıdır. Örneğin, torrefaksiyon sıcaklığının 220 °C'den 275 °C'ye yükseldiğinde katı verim % 94'ten % 56'ya düştüğü belirtilmiştir. Öte yandan, Acharya (2013), yulaf ezmesi konusundaki çalışmasında, torrefaksiyon sıcaklığının 210 °C'den 300 °C'ye yükseldiğinde enerji yoğunluğunda bir artış olduğunu bildirmiştir. Farklı torrefaksiyon sıcaklıklarındaki kütle kaybı veya katı verim, esasen polimerik bileşenler ve uçucu madde hızı üzerindeki sıcaklığın etkisi ile açıklanabilir.

Lignin, diğer iki bileşene göre daha geniş bir sıcaklık aralığında bozunur. Ligninin kararlılığı oksijen içeren farklı fonksiyonel grupların termal kararlılığından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, hemiselülozun termal dayanıklılığı oldukça düşüktür. Dolayısıyla, torrefaksiyon sırasındaki kütle kaybı, hemiselülozun parçalanmasına büyük ölçüde bağlıdır. Hemiselüloz, farklı piroliz reaksiyonlarının başlatılmasında ve ilerlemesinde önemli etkiler göstermektedir. Hemiselülozun bileşimi aynı zamanda biyokütlenin bozunma oranını da etkiler. Örneğin, hemiselülozda daha yüksek ksilan içeren biyokütle, mannan bazlı hemiselülozlu olandan daha sıcaklığa duyarlıdır. Selüloz, selülozik fibrillerin yapılandırılmış kristalimsi olması nedeniyle sıcaklığa karşı hemiselülozdan daha dayanıklıdır. Selülozdaki glikoz monomerleri arasındaki glukosidik bağların kırılması için yüksek sıcaklık gerekir (Nhuchhen vd., 2014). Tablo 3.2 çamın 240-290 °C'deki torrefaksiyon sonucu odundaki uçucu bileşen, sabit karbon ve nemin değişimini göstermektedir.

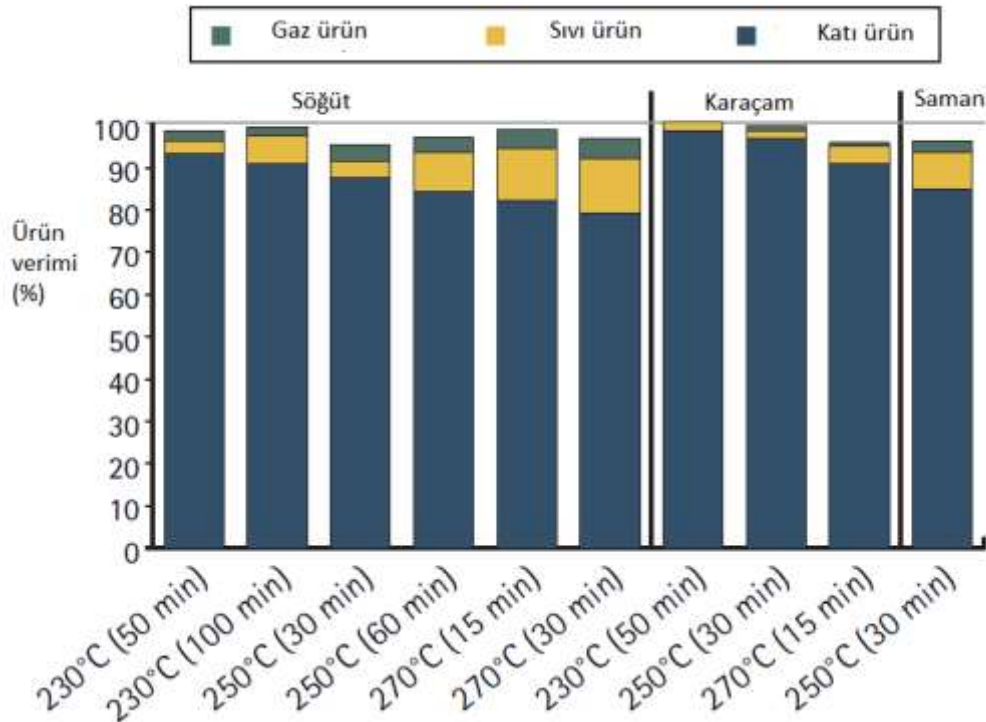
**Tablo 3.2.**Çam ve torrefiye çamın analizi (Nhuchhen vd., 2014)

T (° C)	240 (° C)	250 (° C)	260 (° C)	270 (° C)	290 (° C)
<b>Sabit karbon %</b>	23,55	25,59	25,59	29,38	35,39
<b>Elementel Analiz</b>					
<b>C %</b>	51,14	51,93	53,78	53,57	58,08
<b>O %</b>	42,70	42,18	40,66	40,67	36,40
<b>Lignin (%)</b>	24,9	28,72	33,44	39,23	53,47
<b>Ekstratlar(%)</b>	8,19	14,09	19,35	16,49	17,98
<b>Nem (%)</b>	5,66	4,08	3,96	3,76	3,88
<b>Verim (%)</b>	86,2	81,8	75,7	66,4	48,8

### 3.3.2. Reaksiyon süresi

Hammaddenin reaktör içinde kaldığı süre reaktörlerin tasarımı için önemli bir parametredir. Yanma, gazlaştırma veya piroliz gibi diğer birçok termokimyasal dönüşüm işlemleriyle karşılaştırıldığında, torrefaksiyon için reaksiyon süresi çok daha uzundur. Bu uzun reaksiyon süresi, biyokütlenin reaktör içinde çok uzun süre kalmasını gerektirir. Bu, belirli bir çıkış için reaktörün hacim gereksinimini doğal olarak artırır. Kalma süresi bu nedenle reaktör büyüklüğü üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir. Örneğin, vida tipi bir reaktörde vidanın uzunluğu ve dönme hızı ve taşıyıcı kayış reaktörü içindeki kayış hızı esas olarak gerekli kalma süresine göre belirlenir. Kalma süresi ayrıca katı alan hızını ve hareketli yatak torresinin reaktör yüksekliğini de belirler.

Kalma süresinin net etkisi sıcaklık kadar belirgin olmasa da, kalma süresi torrefiye ürünü daha uzun kalma süresinde etkiler. Şekil 3.4'de Prins vd., (2006a) yaptığı çeşitli torrefaksiyon deneylerinden elde edilen ürün verimleri gösterilmiştir. Katı kütle kaybı kalma süresinde artar, bu da daha düşük bir katı ürün verimi sağlar. Kalma süresinin uzamasıyla karbon içeriğinde bir artış ve torrefiye ürünün hidrojen ve oksijen içeriğinde bir azalma beklenir (Nhuchhen vd., 2014).

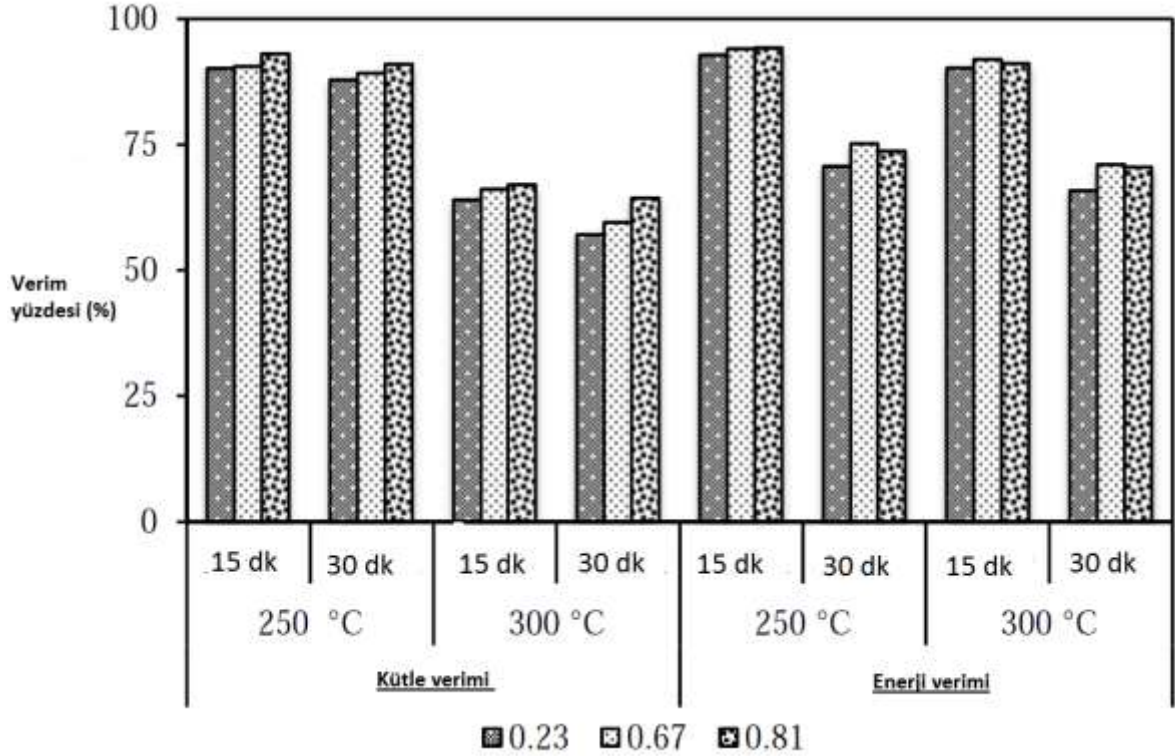


Şekil 3.4. Çeşitli torrefaksiyon deneylerinden elde edilen ürün verimleri (Prins vd.,2006a)

### 3.3.3. Parçacık büyüklüğü

Gereken ısının miktarı biyokütlenin büyüklüğüne, şekline ve özelliklerine bağlıdır. Bu parametreler, reaktörden biyokütle ve biyokütle içerisindeki konvektif ve iletken ısı transfer hızını etkiler. Daha büyük bir biyokütle parçası, birim kütle başına daha az yüzey alanına sahip olduğundan dolayı konvektif ısı transfer hızını azaltacaktır. Parçacık boyutunun kütle ve enerji verimi üzerine etkisi farklı sıcaklık ve zamanlardaki torrefaksiyon işlemi için Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Kütle ve enerji verimlerinde küçük ama tutarlı bir artış gösterir.

Büyük parçacık ayrıca, biyokütlenin anizotropik ve heterojen özelliklerinden dolayı biyokütle içinde üniform olmayan bir ısı dağılımına sahip olabilir. Buna ek olarak, büyük partikül, yüksek kütle transfer direnci nedeniyle içinden uçucu bileşenlerin difüzyonunda zorluklarla karşılaşabilir. Bu nedenle torrefaksiyon işleminin kalitesi tüm partikül boyutları için aynı olmayabilir. (Nhuchhen vd., 2014)



Şekil 3.5. Biyokütlenin parçacık büyüklüğü (mm) farklı sıcaklık ve zamanda kütle ve enerji verimine etkileri ( Peng vd., 2012)

### 3.3.4. Reaktör tipi

Torrefaksiyon için uygun olan reaktörün doğru seçimi, her reaktörün kendine has özelliklere sahip olması ve çok çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip tüm biyokütle tiplerini eşit şekilde işleyememesi nedeniyle çok önemli olabilir. Döner bir tambur reaktör tasarımı Bergman ve arkadaşları tarafından torrefaksiyon için kullanılmıştır.

Doğrudan ısıtılan reaktörlü ısıtma ortamında, genellikle azot biyokütle ile doğrudan temas halindedir. Bununla birlikte, dolaylı olarak ısıtılmış sistemde, reaktör duvarı yoluyla biyokütleyle ısı verilir. Doğrudan ısıtılan bir reaktör, biyokütlenin sürekli karışması nedeniyle iyi ısı transfer özelliklerine sahiptir; bununla birlikte, doğrudan ısıtılan reaktör, düşük ısı transfer katsayısı ve daha uzun katı kalma süresi nedeniyle vidalı reaktöründen daha kötü performans gösterir. Dolum oranının sadece yaklaşık % 10-15 olması reaktör verimini önemli ölçüde azaltır.

Akışkan yataklı bir reaktör, piroliz, gazlaştırma ve yanma gibi biyokütle besleme stoğunun termokimyasal dönüşümünde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu reaktörlerde akışkanlaştırıcı ortam (genellikle gaz), katı, tanecikli, atıl malzeme (kum) yataklarından geçirilerek katının bir akışkan olarak davranmasına neden olur. Bu teknolojinin avantajları, yüksek ısıtma hızı ve ısı transfer katsayısının yanı sıra kuvvetli karışım, geniş yüzey alanı ve ısı taşıyıcısının termal kütlesi nedeniyle sabit ve homojen sıcaklıktır. Bununla birlikte, kum parçacıklarının yıpranması, işlenmiş biyokütlenin kumdan ayrılmasını zorlaştırır, bu da kül içeriğini artırabilir. Ayrıca, düzensiz şekli nedeniyle biyokütlenin akışkanlaşması zor olabilir. Tablo 3.3'de torrefaksiyon işleminde kullanılan reaktörlerin avantajları verilmiştir (Medic, 2012).

**Tablo 3.3.**Farklı türdeki torrefaksiyon reaktörlerin avantajları ve sınırlamaları ( Bi, 2012)

REAKTÖR TİPİ	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
Döner Tambur	<ul style="list-style-type: none"><li>· Kanıtlanmış nispeten basit ekipman</li><li>· Düşük basınç düşüşü</li><li>· Hem doğrudan hem de dolaylı ısıtma imkanı</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Düşük ısı transferi (özellikle dolaylı ısıtmada)</li><li>· Sıcaklığı ölçmek ve kontrol etmek zordur.</li><li>· Diğer reaktörlere kıyasla daha az tampon akış</li><li>· Daha büyük sistem boyutu</li><li>· Sistemi ölçeklendirmede zorluk</li></ul>
Hareketli Yatak	<ul style="list-style-type: none"><li>· Basit reaktör ve yapısı</li><li>· Çok iyi ısı transferi</li><li>· Yüksek yatak yoğunluğu</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Önemli basınç düşüşü</li><li>· Sıcaklığı kontrol etmek zor</li></ul>

**Tablo 3.3.** Farklı türdeki torrefaksiyon reaktörlerin avantajları ve sınırlamaları (devamı)

Vida Tipi	<ul style="list-style-type: none"><li>· Tampon akış imkanı</li><li>· Torrefaction için olgun teknoloji</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Yalnızca dolaylı ısıtma</li><li>· Sıcak nokta olasılığı daha yüksek</li><li>· Düşük ısı transfer hızı</li><li>· Ölçeklendirme problemi</li><li>· Şaft sızdırmazlığı gerektirir.</li></ul>
Çoklu Ocaklı Fırın	<ul style="list-style-type: none"><li>· Kanıtlanmış ekipman tasarımı</li><li>· Daha yüksek ölçeklendirme olasılığı</li><li>· Tampon akışına yakın</li><li>· İyi sıcaklık ve kalma süresi kontrolü</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Diğer doğrudan reaktörlere kıyasla daha düşük ısı transfer hızı</li><li>· Sınırlı hacimsel kapasite</li><li>· Nispeten daha büyük reaktörle</li></ul>
Akışkan Yataklı Fırın	<ul style="list-style-type: none"><li>· Mükemmel ısı transfer hızı</li><li>· Kolayca ölçeklenebilir</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Küçük parçacık boyutu gerektir</li><li>· Yıpranma olasılığı vardır</li></ul>

### 3.4. Torrefaksiyonun Biyokütle Özelliklerine Etkisi

#### 3.4.1. Görünüm

Biyokütlenin rengi, farklı torrefaksiyon aşamalarında yüzey (serbest) nem, bağlı nem ve hafif uçucu gazların kaybı nedeniyle torrefaksiyon yoluyla değişir. Torrefaksiyona biyokütlenin rengi, torrefaksiyonun şartlarına bağlıdır. Örneğin, işlem süresi ve sıcaklık arttığında renk kahverengiden koyuya döner. Isıl işlem altında ürün rengindeki değişiklikler esas olarak hidroliz ve oksidasyon reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Renkteki değişimler dönüşüm derecesinin bir göstergesi olarak da kullanılabilir. Torrefaksiyona biyokütlenin rengi ayrıca ham biyokütlenin türüne ve yoğunluklarına da bağlıdır. Ayrıca ekstraktların renginden etkilenen odunun renginin de ekstraksiyon bileşimindeki farklılıklar nedeniyle değiştiğini bulmuşlardır. pH seviyesine, nem içeriğine, ısıtma ortamına, maruz kalma süresine ve tür türüne bağlı termal bozulma altında hemiselüloz ve ligninin değişimi ve dönüşümü bir üründe koyu bir renk oluşturur. Aldehitleri ve fenollerini oluşturan kimyasal reaksiyonlar da ürünlerin rengini değiştirir. Bu nedenle, ısıl işlemin zamanına ve sıcaklığına bağlı olarak, ürünün rengi açık kahverengiden koyu kahverengiye değişmektedir (Nhucchen vd.,2014).

#### 3.4.2. Öğütülebilirlik

Biyokütlenin öğütülebilirliği torrefaksiyon işlemiyle artırılabilir. Torrefaksiyon işleminden sonra, ürün daha kırılabilir hale gelir ve fiziksel kuvveti azalır, böylece öğütmek için daha az enerji kullanılır. Torrefaksiyon işleminin en önemli faydalarından

biri, geliştirilmiş öğütülebilirliği sebebiyle biyokütle kırılabilirliğinin artırılmasıdır. Biyokütle öğütülebilirliği, yalnızca mevcut kömürle çalışan elektrik santrallerinde doğrudan birlikte ateşleme için değil, aynı zamanda özellikle toz haline getirilmiş ve akışkan yatak sistemlerinde gazlaştırma ve piroliz için de önemli bir özelliktir. Mevcut enerji üretim sistemlerinde kullanılmaya uygun olması için, biyokütlenin kömür benzeri özelliklere sahip olması gerekir.

### **3.4.3. Peletleme**

Peletleme, biyokütleden istenen şekilde sıkıştırılmış ürünler üreten bir yoğunlaştırma işlemidir. Belirlenen parçacık boyutlarında toz biyokütle gerektirir. İşlem görmüş biyoküttelede yeterli hidrojen bağı olmamasından dolayı, peletleme işlemi daha fazla sıkıştırma enerjisi gerektirir. Torrefiye biyokütle parçacıklarını pelet haline getirirken sıkıştırma enerjisi artacaktır. Torrefiye biyokütle materyallerinin plastikleştirilmesi zordur ve önemli bir sürtünme direncine sahiptir. Örneğin, torrefiye ladini peletleme işlemindeki sıkıştırma basıncı, ham ladinden yapılan peletleri için gerekli olan basınçtan yaklaşık 7 kat daha fazladır. Ayrıca torrefaksiyon sıcaklığının pelet kalitesi üzerindeki olumsuz etkisini de bildirmişlerdir.

Torrefiye biyokütle kullanarak pelet üretmenin en büyük avantajlarından biri hidrofobik yapısıdır. Peletlerin hidrofobikliği, torrefaksiyon sıcaklığının artmasıyla artar. Peletler daha küçük partikül boyutu kullanılarak üretildiğinde, peletin hidrofobikliği artar. Kırılabilir peletlerin kullanımı ve taşınması zordur çünkü kolayca kırılabilir ve toz üretebilirler. Torrefiye peletin dayanıklılığı düşüktür ve yüksek torrefaksiyon sıcaklığında daha da azalır (Nhucchen,2014).

### **3.4.4. Taşıma ve Depolama**

Torrefiye biyokütle içinde metreküp başına yüksek miktarda enerji bulunması, odun peletlerine kıyasla sevkiyatın maliyetini düşürür. Torrefaksiyon işlemi sırasında, kütlede bir düşüşün ardından yoğunluk azalır, ancak hacim aynı kalabilir. Peletleme hacmi azalır, sonuçta nakliye kolaylaştırır.

Ham biyokütlenin lojistik sorunları torrefaksiyon ve peletleme ile çözülebilir. Pelet haline getirilmiş işlenmiş malzeme nedeniyle taşınacak ve depolanacak hacim önemli ölçüde azaltılmıştır. Odun peletlerine kıyasla, gerekli kütle, aynı zamanda, torrefiye



peletlerin yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle, aynı enerji üretimi için daha azdır. Önemli bir başka özellik ise, torrefiye malzemenin hidrofobik karakteridir. Doymamış polar olmayan gruplar, OH gruplarını ikame ederek suyu emme kapasitesinde önemli bir kayba yol açar. Torrefiye malzemelerin hidrofobik özelliği, yakıtın bozulma, nem alımı ve kendiliğinden ısınmaya karşı daha az hassas olmasını sağlar. Torrefaksiyondan sonra, torrefaksiyon seviyesine bağlı olarak nem ve su emme azalır. Örneğin, belirli bir ortam sıcaklığındaki zaman ve bağıl nem, belirli yıpranmış peletlerin higroskopik özelliğini belirler. Diğer hammadde türlerinin, bağlayıcıların veya katkı maddelerinin kullanılması, çeşitli sonuçlar gösterebilir( Pourmakhdomi, 2014 ).

### **3.4.5. Nem İçeriği**

Normal olarak, ham madde nem içeriği % 10 ila % 50 arasında değişmektedir, ancak torrefaksiyon bir kurutma işlemi olduğu için, torrefaksiyon koşullarına bağlı olarak, nem içeriği ağırlık bazında % 1 ila % 3'e düşürülür. Tipik olarak, torrefaksiyon bir denge nemi içeriğine ulaşır. Torrefaksiyon sırasında nemin azaltılması üç ana fayda sağlar :

- ✓ Dönüşüm işlemi için nem seviyesinin azaltılması,
- ✓ İstenmeyen suyun taşınmasıyla ilişkili taşıma maliyetlerinin azaltılması
- ✓ Depolama ve nakliye sırasında biyokütle ayrışmasının ve nem emiliminin önlenmesi.

### **3.4.6. Hidrofobi**

Hidrofobiklik, biyokütle besleme stoğunun depolanmasında önemli bir rol oynar, çünkü yıl boyunca biyo-rafineri veya santral işletmesini desteklemek için büyük miktarda biyokütlenin depolanması gerekir. Ayrıca, fazladan su biyokütleyi mikroorganizma büyümesi için uygun bir ortam sağlar. Torrefaksiyon su moleküllerine hidrojen bağlanmasından sorumlu hidroksil gruplarının ortadan kaldırılması ve polar olmayan, hidrofobik bir bileşiğin üretilmesiyle biyokütlenin su itici özelliklerini geliştirir.

Acharjee ve ark, (2011) biyokütlenin denge nemi içeriği, 260 °C'de ıslak torrefaksiyondan sonra % 15'ten (ham biyokütle) yaklaşık % 5'e düşmüştür. Bergman ve

diğ. pelet haline getirilmiş, işlenmiş biyokütle üzerinde suya batırarak 15 saatlik bir su alma testi gerçekleştirmiştir. Peletlerin durumu gözlemlenirken, su alımı gravimetrik olarak belirlemişlerdir. Torrefiye peletlerin, ham biyokütle peletlerine kıyasla önemli ölçüde değişmediği (şişme, parçalanma) ve ağırlık bazında yaklaşık% 7-20 nem emdiği sonucuna varmışlardır. Muhtemelen biyokütle partikülündeki katran yoğunlaşması ve bir hidrofobik kimyasal türün oluşumu nedeniyle, su alımının işlem görmemiş biyokütle ile karşılaştırıldığında % 73 oranında azaldığını bulmuşlardır (Medic, 2012).

### **3.4.7. Enerji yoğunluğu**

Su, asetik asit, metanol ve karbondioksit gibi oksijen ve hidrojen bakımından zengin kimyasal türler, torrefaction işlemi sırasında ham biyokütlenin uçucu madde çıkışı yoluyla serbest bırakılır. Bu bileşikler karbondan daha fazla oksijen ve hidrojen içerdiğinden, işlem görmüş biyokütlenin O / C ve H / C oranı azalır. Biyokütlenin kimyasal özelliklerinde meydana gelen bu değişiklik, yüksek oksijen içeriğine sahip organik materyal aşırı oksidasyona neden olduğu ve proses ısı verimini azalttığı için gazlaştırma için değerlidir. Aynı zamanda biyokütlenin enerji yoğunluğu, torrefaksiyon sırasında oksijen kaybının bir sonucu olarak artar. Torrefiye biyokütlenin enerji ve kütle yoğunluğu, pelet haline getirme yoluyla daha da geliştirilebilir (Medic, 2012).

### **3.5. Torrefaksiyon İşleminin Teknik Zorlukları ve Dezavantajları**

Torrefaction teknolojilerinin geliştirilmesinde en önemli teknik zorluklar, proses gazı işleme, proses yükseltme, öngörülebilirlik ve ürün kalitesinin tutarlılığı, torrefiye edilmiş biyokütlenin yoğunlaştırılması, ısı entegrasyonu ve farklı girdi malzemelerinin kullanımındaki esneklik ile ilgilidir. Amaç, torrefaksiyondan sonra hidrofobik materyal üretmek ve hidrofobik materyali, kömür gibi hava koşullarına karşı koruma olmadan dışarıda depolanabilen ve yoğunlaştırmadan sonra dayanıklı pelet veya briquete dönüştürmektir. Bununla birlikte, büyük çaplı elleçlemeye dayanabilen dayanıklı bir ürün elde etmek için hala kanıtlanmış olmaya devam etmektedir ve hala çözülmeyi bekleyen en önemli zorluktur.

Torrefiye biyoyakıtlar için tamamen geliştirilmiş bir ticari pazar bulunmadığından, fiyatlandırma yapısı ve eğilim belirsizdir. Düzenli odun peletlerine kıyasla daha yüksek ısı değeri için ve ayrıca ürünün kömüre benzer şekilde depolanabileceği varsayımına

dayanarak potansiyel olarak üstün kullanım özellikleri için ödenmesi gereken bir maliyet vardır. İlk büyük ölçekli projelerden edinilen tecrübelerin başarılı olduğu ortaya çıktığında, bu avantaj oldukça yüksek olabilir. Bununla birlikte, bu erken aşamada, işlenmiş peletler için piyasa fiyatını tahmin etmek mümkün değildir. Üretici tarafındaki torrefaksiyon ekonomisi, torrefaksiyon işlemi sırasında önemli malzeme kaybı nedeniyle düşük maliyetli bir hammadde gerektirir.



#### 4. PELETLEME

Peletleme, maksimum 25 mm çapında sıkıştırılmış silindirik parçalar üretmek için yüksek basınç altında biyokütlenin kurutulması ve şekillendirilmesi olarak tanımlanabilir. Peletleme işleminin amacı daha küçük hacimde enerji yoğunluğu yüksek yakıt elde edilerek depolanma ve nakliye kolaylığı ile elektrik ve diğerk kimyasal maddelere dönüştürülmesi için biyokütlenin yoğunlaştırılmasıdır. Peletleme işleminin bir başka avantajı, malzemenin taşınmasını ve akış kontrol hızını kolaylaştıran serbest akışa olanak sağlamasıdır. 1880'de ilk yoğunlaştırma patenti ABD'de yayınlandı. Talaş veya diğerk ahşap artıkları 150 ° C'ye ısıtıldı ve sonra bir buhar çekici ile sıkıştırıldı. Bu işlemler ilk başta hayvan yemi üretmek için kullanılmış ve daha sonra enerji piyasası için yoğunlaştırılmış yakıt üretimine geçmiştir.

Peletleme açısından yoğunlaştırma ticari hale getirilmiştir. Örnek olarak, 120 ton / gün kapasiteli bir tesis 1976'dan beri Oregon'da faaliyet göstermektedir. Ayrıca, Finlandiya ve İsveç, Avrupa'da peletleme teknolojisinde önde gelen iki ülkedir. 2001 yılında pelet üretimi 700.000 tonu aşmıştır.

Pelet üretimi için ham madde parçacıklarının maksimum 3-20 mm ve nem içeriğinin % 10-15'in altında olmasını gerektirir. Bununla birlikte, pistonlu pres % 20'ye kadar nem içeriğini telafi edebilir. Peletleme şeklinde biyokütle yoğunlaştırılması 150 °C'lik bir sıcaklıkta meydana gelir. Selüloz, 250 °C'nin altındaki sıcaklıklarda kararlıdır. Bununla birlikte lignin, 100 ° C'de yumuşamaya başlar ve odunun kalıplanmasına izin verir. Su sıkıştırma işleminde önemli bir rol oynar. Hammadde çok kuru veya çok ıslaksa, yoğunlaştırma için gereken basınç büyük oranda artar., %10 -% 25'lik nem içeriğinin optimal olduğu belirtilmektedir. Böylece, lignini yumuşatmak ve istenen nem içeriğini elde etmek için besleme stoku 50 ila 100 °C'ye ısıtılır ve yaklaşık 150 °C'de mekanik yoğunlaştırma uygulanır.

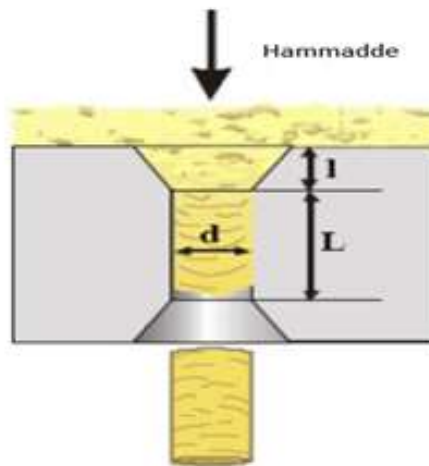
Pelet üretimi temel olarak en az dört adımdan oluşur. Bu adımlar kurutma, öğütme , peletleme ve soğutmadır.

**Kurutma:** Taze biyokütlenin nem içeriği% 50 civarındadır. Peletleme işleminde, biyokütle % 10-15 nem içeriğine kurutulur. Bu sadece enerji yoğunluğunu arttırmakla kalmaz, aynı zamanda biyokütle ağırlığı azaldığından taşıma işleminide kolaylaştırır. Diğer bir avantaj, kurutulmuş biyokütlenin depolama sırasındaki mikrobiyal bozunmalara karşı daha az hassas olmalarıdır. Biyokütle kurutucuları içerisinde tamburlu kurutucu, buharlı kurutucu (doğrudan veya dolaylı) ve sıcak hava kurutucu yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir.

**Öğütme:** Genel olarak bu aşamada çekiçli değirmenler kullanılır. Biyokütle 3 mm'den büyük olmayan ince parçalar halinde öğütürler. Bununla birlikte, elek boyutu üretilen topakların çapına bağlıdır. Pelet değirmenine besleme düzgün malzemeler üretmek için öğütme gereklidir. Çekiçli değirmen genel olarak ısıya dönüştürülen bir elektrik motoru ile çalışır. Bu ısı aynı zamanda bu aşamada ham maddeden daha fazla nem almak için kullanılır.

**Peletleme:** İki ana peletleyici türü vardır: yassı kalıp peletleyici veya halka kalıp peletleyici. Gevşek malzemeler peletleme boşluğuna beslenir. Kalıp dönüşü ve silindir basıncı, malzemeyi kalıp boyunca zorlayarak topaklara sıkıştırır. Şekil 4.1. Pelet presi gösterilmiştir. Aşınma direncini arttırmak ve biyokütleyi bağlamak için bu aşamada katkı maddeleri veya bağlayıcı maddeler kullanılabilir. Bunlar genellikle pelet kütlelerinin ağırlıkça yaklaşık % 1'ine eklenir.

**Soğutma:** Peletleme işlemi sırasında uygulanan basınç peletleri parçalayabilir. Bu nedenle, soğutma işlemi peletleri stabilize etmek, sertleştirmek ve oluşturmak için gereklidir . Karşı akış soğutucular çoğunlukla bu işlem için kullanılır.



Şekil 4.1. Pelet presi ( Kauriinoja, 2010 )

Peletlerin yoğunluğu yakıtın çok önemli bir göstergesidir, çünkü yakıtın bir birim hacmindeki enerji yoğunluğunun yanı sıra peletlerin mukabil sertliğini belirler. Bu parametre, yakıt üzerinde ne kadar yoğun veya derin bir torrefaksiyon yapıldığının ölçütüdür. Torrefiye peletlerin yoğunluğu, kalıptaki sıcaklıkları arttırırken, çok yüksek basınçlarda sıkıştırmak suretiyle arttırılabilir. En iyi pelet kalitesi, reaksiyon sıcaklığının arttırılması ve kalma süresinin kısaltılmasıyla elde edilebilir.

Pelet haline getirilmiş işlenmiş malzeme nedeniyle taşınacak ve depolanacak hacim önemli ölçüde azaltılmıştır. Odun peletlerine kıyasla, gerekli kütle, aynı zamanda, işlenmiş peletlerin yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle, aynı enerji üretimi için daha azdır. Özellikle hava koşullarına karşı korumalı depolama gerekmiyorsa, taşıma ve depolama sürecinde önemli tasarruf sağlanır. Önemli bir başka özellik ise, işlenmiş malzemenin hidrofobik karakteridir. Doymamış polar olmayan gruplar, OH gruplarını ikame ederek suyu emme kapasitesinde önemli bir kayba yol açar. Peletlenmiş malzemelerin hidrofobik özelliği, yakıtın bozulma, nem alımı ve kendiliğinden ısınmaya karşı daha az hassas olmasını sağlar. İşlendikten sonra, işlenme seviyesine bağlı olarak nem ve su emme azalır. Örneğin, belirli bir ortam sıcaklığındaki zaman ve bağlı nem, torrefiye peletlerin higroskopik özelliğini belirler (Uslu,2005).

## 5. PELETLEME VE TORREFAKSİYONUN BİRLİKTE UYGULANMASI

Torrefaksiyon teknolojilerinin ticarileşmesini hızlandırmak için etkili bir yaklaşım, torrefaksiyonu mevcut bir biyoenerji zincirine entegre etmektir. Modern bir biyoenerji endüstrisi olan pelet endüstrisi, torrefaksiyonun entegrasyonu için ideal bir yoldur. Torrefiye biyokütlenin kütle yoğunluğunun ham biyokütleden daha düşük olması taşıma ve ekonomik açıdan zorluklara sebep olur. İşlenmiş biyokütlenin küresel olarak ticareti yapılan bir biyoenerji ürünü olarak etkin kullanımını kolaylaştırmak için malzemenin yoğunlaştırılması gerektiği açıktır.

Peletleme işlemi lojistik sorunları gidermede etkili olmasına rağmen odun peletlerinin kömürle birlikte yakılması sınırlıdır. Odunun lifli yapısı ve nispeten düşük yakıt değeri, farklı yakıt özelliklerinin yanı sıra odun peletlerinin taşınması, depolanması ve işlenmesi için gereken ek sermaye yatırımı kömür ile birlikte yakma işleminde% 10 oranında kullanılmasına neden olur. Torrefaksiyon işlemi odun peletlerinin kullanımındaki sınırlamalarının birçoğunun üstesinden gelebilir ve böylece enerji üretim pazarlarında biyokütle kullanımının genişletilmesine yardımcı olabilir.

Odun peletlerinin enerji yoğunluğu (8–11 GJ /m<sup>3</sup>) ,odun talaşının enerji yoğunluğundan (2–3 GJ /m<sup>3</sup> ) yaklaşık 3–4 kat daha fazla olmasına rağmen, kömürden 18–24 GJ /m<sup>3</sup> daha düşüktür. Peletleme işleminin torrefaksiyon ile birleştirilmesiyle, enerji yoğunluğu düşük dereceli kömürün(15–18 GJ /m<sup>3</sup>) enerji yoğunluğuna yükseltilebilir (Tablo 5.1 ) (Kumar vd,2016).

**Tablo 5.1.** Odun talaşı, odun peleti, torrefiye pelet, torrefiye talaş ve kömürün özellikleri (Kumar vd,2016)

	Odun Talaşı	Odun Peleti	Torrefiye Odun Talaşı	Torrefiye Pelet	Kömür
Nem İçeriği (%)	20-50	7-10	1-5	1-5	10-15
Kalori Değeri (MJ/Kg)	15-16	15-16	20-24	20-24	23-28
Uçucu Madde İçeriği (%)	70-75	70-75	50-60	50-60	15-30

**Tablo 5.1.** Odun talaşı, odun peleti, torrefiye pelet, torrefiye talaş ve kömürün özellikleri (Kumar vd,2016) (devamı)

Yığın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	100-200	550-750	450-850	450-850	800-850
Enerji yoğunluğu (GJ/m <sup>3</sup> )	2-3	8-11	4-5	15-18	18-24
Higroskopik özellik	Hidrofobik	Hidrofobik	Hidrofobik	Hidrofobik	Hidrofobik
Biyolojik parçalanma	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Hayır
Ürün kararlılığı	Hayır	İyi	Yüksek	Yüksek	Yüksek

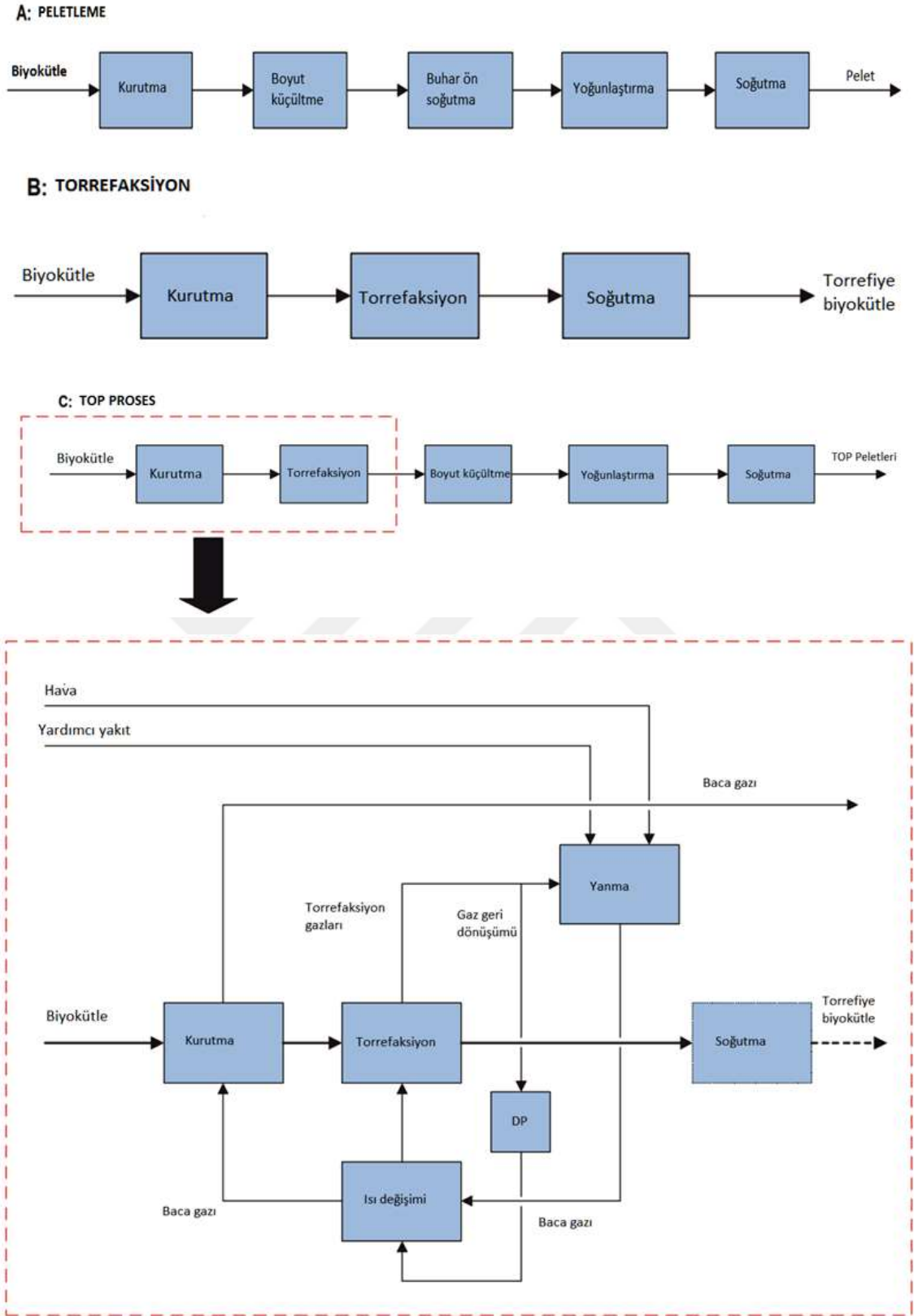
### 5.1. TOP Prosesi

TOP prosesi, çeşitli biyokütle besleme stoğundan biyopeletlerin üretimi için yeni bir teknolojiyi tanımlamaktadır. Bu yeni teknoloji, torrefaksiyon ile peletlemeyi (yani yoğunlaştırma) birleştirir ve TOP işlemi olarak adlandırılır. Bu teknoloji tarafından üretilen peletler TOP peletler olarak adlandırılır ve yüksek yakıt kalitesine sahiptir.

Peletleme işlemine torrefaksiyonun dahil edilmesi bir üretim tesisinin sermaye yatırımını arttırsa da, operasyonel maliyetlerin azalması nedeniyle toplam üretim maliyetleri azalır.

Bir biyokütle peletleme işlemi tipik olarak, yoğunlaştırma işleminden önce kurutma ve boyut küçültme işlemlerinden oluşur. Yoğunlaştırma işleminden sonra sıcak biopelletler soğutulur. Biyokütlenin buharla yumuşatılması, liflerin yumuşatılmasıyla yoğunlaşma sürecini arttırmak için yaygın olarak uygulanır. Torrefaksiyon tipik olarak biyokütlenin ön kurutulmasından, torrefaksiyon ve ürün soğutmadan oluşur. Bu nedenle, her iki sürecin de temel yapısı arasında büyük benzerlik vardır. TOP işlemi Şekil 5.1'e göre torrefaksiyon ve peletlemeyi birleştirir.





**Şekil 5.1.** Peletleme, torrefaksiyon ve TOP işleminin temel işlem yapıları. Alt kısım, biyokütlenin ön kurumasını içeren torrefaction işleminin öngörülen kavramsal yapısını gösterir (Bergman vd, 2005). (DP: basınç düşüşü geri kazanımı)

Torrefaksiyon işlemi, kurutmadan sonra ve boyut küçültmeden önce fonksiyonel bir birim olarak sunulur. TOP süreci, torrefaksiyon ve yoğunlaştırmayı bir adımda birleştirmez. Şekil 5.1'in alt kısmı, torrefaksiyonun kavramsal işlem yapısını temsil eder. Gösterilen işlem düzeni, torrefaksiyon sırasında geri kazanılan sıcak gaz vasıtasıyla doğrudan biyokütlenin ısıtılmasına dayanmaktadır. Sıcak gaz, torrefaksiyon gazının kendisinden oluşur ve her döngüden sonra tekrar basınçlandırılır ve ısıtılır. Torrefaksiyon ve ön kurutma için gerekli ısı, serbest torrefaksiyon gazının yanması ile üretilir(Bergman, 2005).

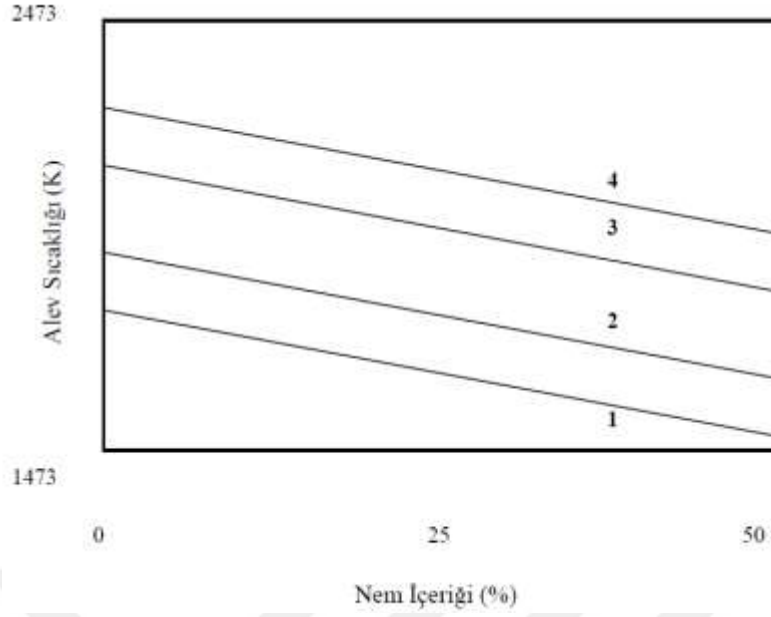


## 6. BİYOKÜTLENİN YANMASI

Yakma işlemi biyokütleyle uygulanan prosesler içerisinde en önde gelen teknolojidir. Toplam biyokütle enerjisinin % 95'in den fazlası, biyokütlenin doğrudan yakılması sonucunda elde edilmektedir. Biyokütle ile oksijenin hızlı bir şekilde kimyasal tepkimeye girmesi sonucu enerji açığa çıkması ve bu sırada organik maddenin oksitlenerek su ve karbondioksit açığa çıkarması biyokütlenin yanma sürecidir. Normal koşullar altında biyokütle yakıldığında, ortamda yeterli oksijen mevcut ise, görünebilir radyasyon halinde bir alev meydana gelir. Alev içerisindeki sıcaklık; tepkime süresinin, yanma hızının, alev hızının ve çevreye transfer olan enerjinin bir fonksiyonudur. Farklı nem içeriğine sahip odunun fazla hava kullanılarak yakılmasına ait teorik alev sıcaklıkları Şekil 6.1 'de görülmektedir. Biyoküttelede 1773 K gibi yüksek alev sıcaklıklarına çıkmak için yakıtın kuru olması ve hava fazlasının düşük tutulması gerekmektedir ( Meteoğlu, 2006).

Lignoselülozik maddeler doğrudan yanıcı değildir. Ancak, yeterince güçlü bir enerji kaynağı veya pilot ateşleme altında odun, gaz fazında alevlenme ile yanan uçucu ürünlere parçalanır. Karbon atığı, yüzey oksidasyonu ile nispeten daha düşük hızda yanar veya parlama şeklinde yanma gerçekleşir. Direkt yanma işleminde, odun ortamda yeterli oksijen bulunması durumunda yanar ve enerji salınır. Odunun yanması aşağıdaki 3 basamakta gerçekleşir.

- İlk olarak, ısı ile odun yakıtındaki su buharlaşır,
- İkinci olarak, uçucu hidrokarbonların çıkışı gerçekleşir ve ısının verilmesiyle oksijen ile yanma gerçekleşir.
- Son olarak, daha fazla ısı salınır ve yüksek sıcaklıklarda sabit karbon ile oksijenin reaksiyonu sonucu yanma tamamlanır.

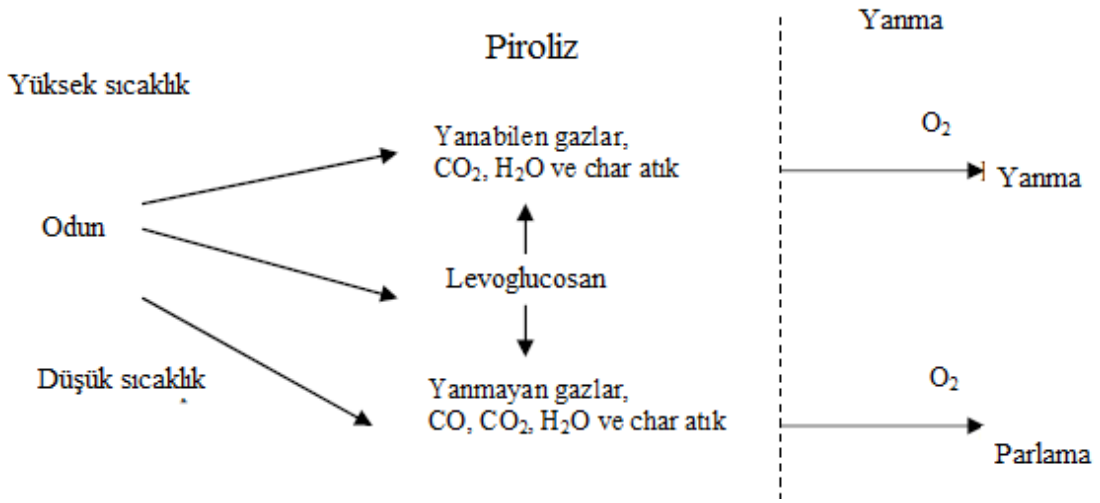


**Şekil 6.1** Teorik alev sıcaklığının odunun nem içeriği ve fazla hava miktarına göre değişimi Hava Fazlası: 1: %30, 2:%20, 3: %10, 4: %0) (Meteoğlu, 2006)

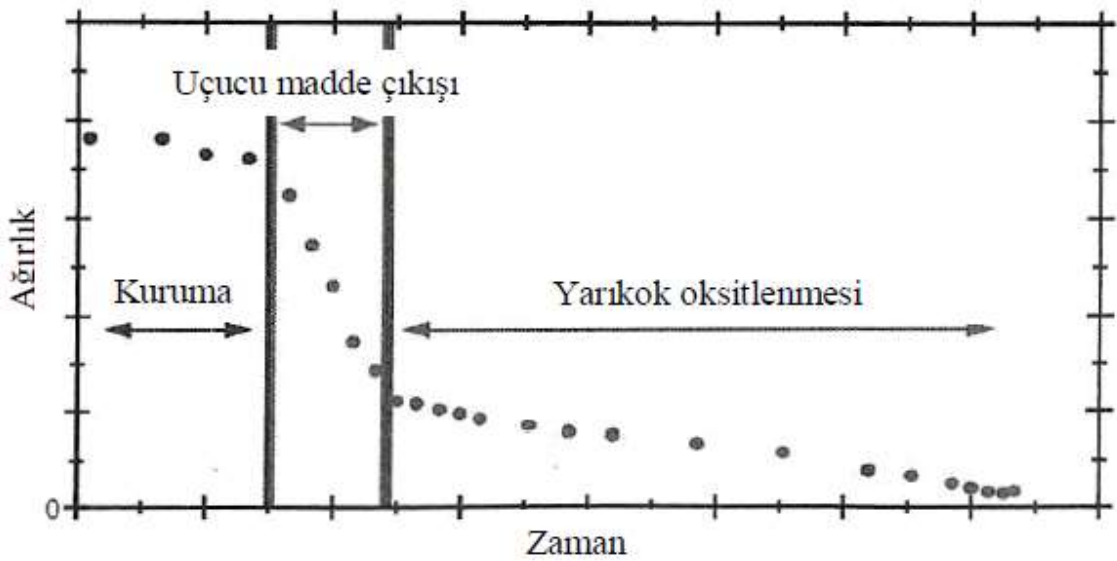
Odun yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında odunun yapısında değişimler meydana gelir. Yapıda meydana gelen değişimler sıcaklığa ve zamana bağlıdır. 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kimyasal bağlar parçalanır. Bağların parçalanması sıcaklığın artması ile artış gösterir. 100-200 °C arasında karbondioksit, eser miktarda organik bileşikler ve su buharı gibi yanmayan ürünler oluşur. 200 °C'nin üzerinde selüloz parçalanarak alevlenen uçucular oluşur. Uçucu bileşenlerin hava ile karışması ve tutuşma sıcaklığına ısıtılması durumunda yanma gerçekleşir. Bu reaksiyonlardan enerji katıya salınır, piroliz ve yanma reaksiyonları gerçekleşir. Yanan karışım görünür bölgedeki radyasyonu yaymak için yeterli enerjiyi biriktirirse alevli yanma meydana gelir. 450 °C'nin üzerinde bütün uçucu materyaller yanar ve geriye katı aktif karbon kalır. Bu karbon CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O ile okside olur. Bu nedenle bu karbonun oksidasyonu akkor olarak adlandırılır. Şekil 6.2' de selülozun piroliz ve yanma reaksiyonları verilmiştir. Odunun termal reaksiyonları bileşimine bağlı olarak değişebilir. Hemiselüloz selülozdan daha az karardır ve yanmayan gazları salar. Lignin selülozdan daha fazla karbon üretir(Yorulmaz, 2006).

Şekil 6.3'de katı biyokütlenin yanmasına ait mekanizma görülmektedir. Uçucu maddenin çıkışı ve yanma basamağı çok hızlı olduğundan biyokütlenin yanma kinetiğini yarıkokun yanma basamağı kontrol eder. Biyokütlenin yakma sistemlerinde yakılması sırasında dikkat edilmesi gereken durumlar bulunmaktadır. Bu durum

biyokütlenin yapısal farklılığından kaynaklanmaktadır. Kömür ile kıyaslandığında biyokütlenin ısıl değerinin, tanecik yoğunluğunun ve yığın yoğunluğunun kömürden düşük olması biyokütlenin enerji katkısı başına düşen nakliye, depolama ve sahada taşıma maliyetlerini yükseltmektedir. Aynı zamanda biyokütlenin enerji yoğunluğunu artırmak için küçük parçalara ayırma, sıkıştırma (yoğunlaştırma) ve kurutma işlemleri gerekmektedir. Bu durumlar yakma sistemlerinin boyutları açısından önemlidir (Baykan, 2011).



Şekil 6.2. Selülozun piroliz ve yanma reaksiyonları (Schniewind, 1989; Yorulmaz, 2006).



Şekil 6.3. Biyokütlenin yanma süreçleri (Baykan, 2011)

## 7. LİTERATÜR TARAMASI

Basu (2010 ) pirinç kabukları ve dört tarım artığının (talaş, yer fıstığı kabuğu, küspe ve su sümbülü) torrefaksiyonunu incelemişlerdir. İşlem 250-300 °C ve 1-2 saat arasında yürütülmüştür. Bu çalışmada elde edilen ürünlerin kahverengimsi bir görünümde olduğu nem ve uçucu madde miktarının azaldığı, kül miktarının arttığı, sabit karbon ve enerji yoğunluğunun arttığını vurgulamışlardır. Kütle ve enerji verimi arasındaki farkın şiddetli torrefaksiyon sıcaklıklarında arttığı belirlenmiştir.

Bridgeman vd. (2010) çalışmalarında, iki enerji ürünü olan söğüt ve miscanthus torrefaksiyonunun öğütülebilirlik üzerindeki etkisini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Ham biyokütle ve düşük sıcaklıkta torrefiye edilmiş biyokütle, çok düşük öğütülebilirlik göstermiştir. Bununla birlikte, torrefaksiyon daha yüksek sıcaklıkta gerçekleştiğinde biyokütle kömürüne benzer bir öğütülebilirlik davranışı sergilerken, torrefiye edilmiş miscanthus'ların söğütten daha kolay öğütülebildiğini gözlemlemişler. Torrefiye miscanthus'un partikül büyüklüğü dağılımının, kömür ile karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür.

Medic ,(2012) çalışmasında biyokütle enerji yoğunluğunu artırmak ve nem içeriğini azaltmak için torrefaksiyon işlem parametrelerini araştırmıştır. Tercih edilen biyokütle (mısır sapı), üç nem içeriği seviyesinde (% 30, 45 ve 50), üç farklı sıcaklıkta (200, 250 ve 300 ° C) ve üç farklı reaksiyon süresinde (10, 20 ve 30 dakika) işlenmiştir. Katı, gaz ve sıvı ürünler analiz edilmiş ve reaksiyonun kütle ve enerji dengesi ölçülmüştür. Proses sıcaklığındaki artışla birlikte enerji yoğunluğunda genel bir artış (% 2-19) ve kütle ve enerji veriminde düşüş (sırasıyla% 3-45 ve% 1-35) gözlenmiştir. Kütle ve enerji kayıpları da, başlangıçtaki biyokütle nem içeriğindeki artışla birlikte artmıştır.

Lu vd. (2012), okaliptüs ağacının ve yağlı hurma elyafının azot ve hava ortamında torrefaksiyonunu incelemişlerdir. Katı ürün veriminin her iki biyokütle için sıcaklık ile azaldığını ve hava ortamında yürütülen deneylerde hem katı hemde enerji veriminin azot ortamına göre düşük olduğu sonucuna varmışlardır.

Huang vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada pirinç samanının ve pennisetum'un mikrodalga torrefaksiyonu araştırılmıştır. Bu çalışmada 2,45 GHz frekansında bir mikrodalga cihazı kullanılmış ve 150 – 200 – 250 - 300 ve 350 W mikrodalga güç seviyelerinde sıcaklık profilleri araştırılmıştır. Sıcaklık profillerinin logaritmik eğriye

benzediği ve bu nedenle sıcaklığın yaklaşık 10-15 dakikalık işlem süresinden sonra çok yavaş bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Saleh vd. (2013), üç farklı biyokütlenin torrefaksiyonu üzerine biyokütle türünün, sıcaklığın, işlem süresinin ve partikül büyüklüğünün etkisini incelemişlerdir. Aynı zamanda çalışmalarında torrefiye ürünlerin öğütülebilirlikleri de bilyeli değirmende incelenmiştir. Samanın düşük sıcaklıkta ladinden daha yüksek bir kütle kaybına uğradığı belirlenmiştir. Saman ve ladinin gözlenen farklı kütle kaybı profilleri, hemiselüloz tipi, lignoselüloz bileşimi ve külün katalitik özellikleri veya biyokütle parçacıklarının şekli ve kütledeki farklılıklar ile ilgili olabileceği öngörülmüştür.

Arshanitsa vd. (2016) yumuşak odun olarak çam ve ladin karışımını ve sert odun olan kavağın kimyasal bileşimini incelemek için farklı sıcaklıklarda (150-300°C) torrefaksiyonu konvektif ısıtma kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Deneyler argon atmosferinde, sabit hızda, 120 °C -300 °C aralığında değişen sıcaklığa kadar ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. İstenilen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra, numune reaktör içinde 10 dakika boyunca izotermal olarak bu sıcaklıkta tutulmuştur. Sonuç olarak ekstrakte edilebilir bileşiklerin oluşumu izlenmiş ve ekstrakte edilebilir bileşiklerin oluşumunda sert odun için 210-280 °C yumuşak odun için 250-300 °C aralığında önemli bir artış bulunmuştur. İşlem sıcaklığının daha da artmasıyla (sırasıyla sert ve yumuşak odun için sırasıyla 210 ve 250 °C'ye kadar), polimerik parçalanma işlemleri önemli ölçüde gelişmiş ve özellikle ekstrakte edilebilir bileşiklerin oluşumunun artmasına neden olduğu görülmüştür.

Ru vd. (2015) çalışmalarında yerel bir kereste fabrikasından temin ettikleri kavak odununu kullanmışlar. Torrefaksiyon işlemi, 10 cm çapında kuvars camdan yapılmış yatay bir tüp fırınında gerçekleştirilmiştir. Torrefaksiyon sırasında salınan uçucular, saf azot ile süpürülmüştür. Ağırlık kaybının en fazla, 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda meydana geldiği görülmüştür. Selüloz içeriğinin % 55 'den % 43.7' ye (300 ° C'de torrefiye edilmiş numunede) düştüğü, hemiselüloz içeriğinin ise % 22.1'den 4.6'ya düştüğü görülmüştür.

Wang vd. (2016) numune olarak tipik bir yumuşak ağaç olan Pinus bungeana seçmişlerdir. Kinetik modellemeye dayanarak yumuşak odun pirolizi üzerinde torrefaksiyonun etki mekanizmasını incelemişlerdir. Numune ilk önce öğütülmüş ve 0.18-0.25 mm'ye eilenmiş, daha sonra 60 °C'de kurutulmuştur. Torrefaksiyon, azot atmosferinde bir tüp fırınında gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 10 g numune, 200 °C, 225

°C, 250 °C, 275 °C ve 300 °C' lik sıcaklıklarda 30 dk boyunca işleme tabi tutulmuştur. Torrefaksiyon sıcaklığı arttıkça, biyokütlede O / C ve H / C oranlarının azaldığı 225-250 °C sıcaklık aralığındaki değişimlerin 250-300 °C'den çok daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Brachi vd. (2016) çalışmalarında numune olarak domates kabuğu kullanılmış ve akışkan yatak reaktör kullanılarak ana işlem değişkenlerinin (sıcaklık ve zaman) hem temel performans parametreleri (yani kütle ve enerji verimleri) hem de katı ürünün ana özellikleri (yani elementel bileşim, kül içeriği, kalorifik değer) üzerindeki etkisini incelenmiştir. Akışkan yataklı reaktördeki deneyler, torrefaksiyon süresi 5, 15 ve 30 dakika tutularak 200, 240 ve 285 ° C'de gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıkların ve uzun kalma sürelerinin öğütülmüş domates kabuklarının kalorifik değerinde bir artışa yol açtığı gözlenmiştir. Kalorifik değer, 285 °C ve 30 dakika muamele edilen biyokütle için 1,2 kat artmıştır. Torrefaksiyon işleminin bu olumlu etkileri, kütle verimini (yaklaşık olarak % ~75 ve ~94, daf) ve enerji verimini (~90% ve ~96, daf) tatmin edici seviyelerde tuttuğu ortaya çıkmıştır. Akışkan yataklı reaktörün, odunsu olmayan biyokütlenin torrefaksiyonu için sabit yataklı reaktörden daha uygun olduğu görülmüş ve torrefaksiyon sırasında kolayca tutuşma veya karbonlaşma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur.

Isemin vd.(2017) kömür atıklarının ve samanın eşzamanlı yanması ile yeni bir teknolojinin geliştirilmesi için gereken ön koşulları incelemişlerdir. Bu teknoloji kömür ve biyokütle karışımından pelet üretimini ve üretilen peletlerin 230 -270 °C arasındaki bir sıcaklık aralığındaki torrefaksiyonunu içermektedir. Sonuç olarak, torrefiye peletlerin, ham peletlerle karşılaştırıldığında % 17 daha yüksek kalorifik değere ve 1,55 kat daha düşük higroskopiklik limitine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, kömür ve biyokütle karışımından üretilen torrefiye edilmiş peletlerin avantajları dış mekanda depolama ve yanma verimliliğinin % 5 oranında arttırdığını görmüşlerdir.

Barta-Rajnai vd.(2017) çalışmalarında, Norveç ladininin (kök odun, ağaç kabuğu ve güdük) farklı kısımlarının torrefaksiyonunu incelemişlerdir. Torrefaksiyon deneyleri, 1 L / dk akış hızları kullanılarak azot atmosferinde elektrikli fırına yerleştirilen tüp reaktör içinde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 80 g numune, 15 ° C / dak. ısıtma hızında, tüp reaktörde 225, 275 ve 300 °C sıcaklıklarda 30-60 dk izotermal periyotlarla ısıtılmış, ardından reaktör oda sıcaklığına soğutulmuştur. 275 °C'ye kadar torrefaksiyon sıcaklığının etkisinin kalma süresinin etkisinden daha büyük olduğu görülmüş, 300 °C



sıcaklıkta ise kalış süresinin yoğun selülozun ayrışmasından dolayı torrefiye edilmiş numunelerin bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Kajina vd.(2017)300 °C'de çimen, pirinç sapı, ve mısır koçanının pirolitik davranışı çeşitli karışım oranları, 100:0, 50:50 ve 70:30 için incelenmişlerdir. Deneylerden önce, bütün numuneler bir kesici değirmen tarafından kurutulmuş, öğütülmüş ve fırın içindeki torrefaksiyon için yaklaşık 0.5-2 mm ve TG ile termogravimetrik çalışma için 0.1 mm'lik bir partikül boyutuna elenmiştir. Pirinç sapı ve çimenin torrefaksiyonundan sonra yüksek kül içeriği ve çok fazla miktarda katı ürün verimi gözlemlenmiştir. Ham biyokütle ve bunların karışımlarının tutuşma sıcaklıklarının 235 °C ve 260 °C arasında olduğu tespit edilirken, torrefiye edilmiş malzemelerin ise 250 ila 288 °C arasında olduğu görülmüştür. Her bir durumda, torrefiye biyokütle, ham biyokütleden daha yüksek yanma sıcaklıkları göstermiştir.

Yılgin vd (2019) kayın ağacı talaşından yapılmış peletlerin 493, 533 ve 573 K'de torrefaksiyonun incelendiği çalışmada elde edilen torrefiye peletlerin yanma davranışları 873, 973 ve 1073 K'de incelenmiştir. Torrefiye peletlerin gözenekli yapısına rağmen karbon yanma hızlarının ham peletlerden düşük olduğu ve karbon yanma hızının torrefaksiyon şiddeti ve yakma sıcaklığı ile azaldığı vurgulanmıştır.

## 8. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 8.1. Pelet Hazırlama

Çalışmada biyokütle olarak Malatya ili kereste doğrama atölyesinden temin edilen kayın ağacı odunu talaşı (KAO) kullanıldı. Talaş, pelet hazırlama ve proximate (kısa analiz) analizde (nem, uçucu ve kül içeriği) kullanılmak üzere -100 mesh tane boyutu elde edilmek için elendi. Biyokütlenin nem içeriği Mettler LJ16 nem tayin cihazında belirlendi. Uçucu madde ve kül analizleri ise kül fırınında ASTM standartlarına göre belirlendi.

Toz biyokütleden pelet hazırlama işlemi FTIR cihazına ait hidrolik pres peletleme cihazında yapıldı (Şekil 8.1). Bunun için yaklaşık 1 g toz örnek pelet hazırlama kalıbına konarak üzerine 5 ton basınç 30 s süre ile uygulandıktan sonra 13 mm çaplı pelet kalıptan çıkarıldı. Deneyde kullanılacak bütün peletler benzer şekilde hazırlandı.



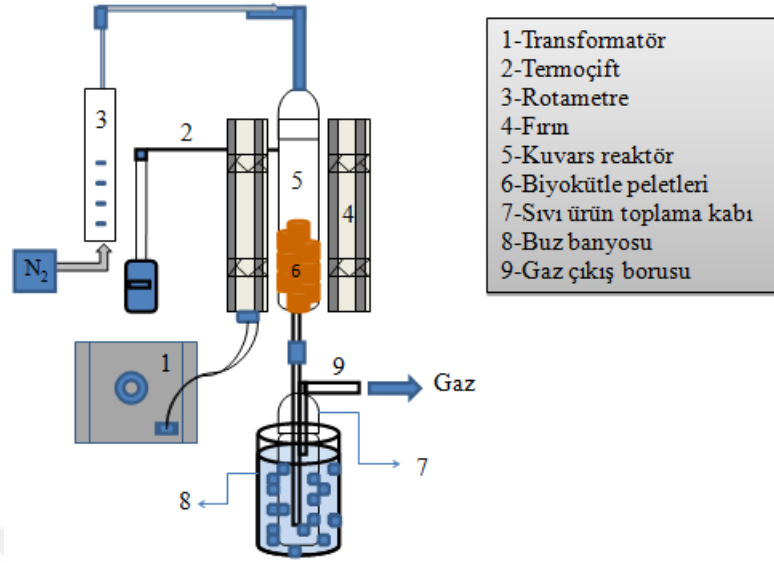
Şekil 8.1. Hidrolik pres

## 8.2. Torrefaksiyon Deneyi

Torrefaksiyon deneyleri 105 mm çapında 115 mm yüksekliğinde içinden direnç telleri geçirilmiş refrakter malzeme bulunan silindirik kesitli dikey bir kamarada yürütüldü. Fırın içerisine 3,5 cm çaplı 15 cm uzunluğunda pyrex bir reaktör yerleştirildi. Fırının ısıtılması değişik voltaj transformatörü ile yapıldı. Torrefaksiyon ortam sıcaklığı fırın içerisinden geçirilen ve pyrex reaktör ile temas halinde bir termoçift (NiCr) yardımı ile takip edildi. Deney setine torrefaksiyon sırasında oluşan sıvı ürünün toplanması için buz banyosuna yerleştirilmiş sıvı ürün toplama kabı eklendi. İnert ortam N<sub>2</sub> gazı ile sağlandı. Torrefaksiyon işleminin yapıldığı deney sistemi Şekil 8.2'de görülmektedir.

Torrefaksiyon deneylerinde fırın içerisindeki reaktöre her biri yaklaşık 1 g olan peletlerden 8 adet başlangıç ağırlığı belirlenerek yerleştirildi. Sistem ısıtılmadan önce sistemden 100 ml/dk akış hızında azot gazı (5 dk) geçirildi. Sistem daha sonra değişik voltaj transformatörü ile belirlenen çalışma sıcaklığına ısıtıldı. Fırın çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra belirlenen sürelerde torrefaksiyon işlemi azot atmosferi altında yürütüldü. Çalışma süresi sonunda sistemin ısıtılması durduruldu ve azot atmosferi altında sistem yaklaşık 50 °C ulaşınca kadar soğutuldu. Soğuma işleminden sonra reaktör içerisindeki peletler çıkarılarak deney sonundaki ağırlıkları belirlendi. Katı ürün verimi belirlendi. Ağırlığı deney öncesi bilinen sıvı ürün toplama kabı deney sonunda tartılarak ağırlık farkından sıvı ürün miktarı belirlendi. Gaz ürün verimi ise farktan belirlendi. Cam set bir sonraki deney için tetrahidrofurana ile yıkandı ve kurutularak bir sonraki deney için hazırlandı.

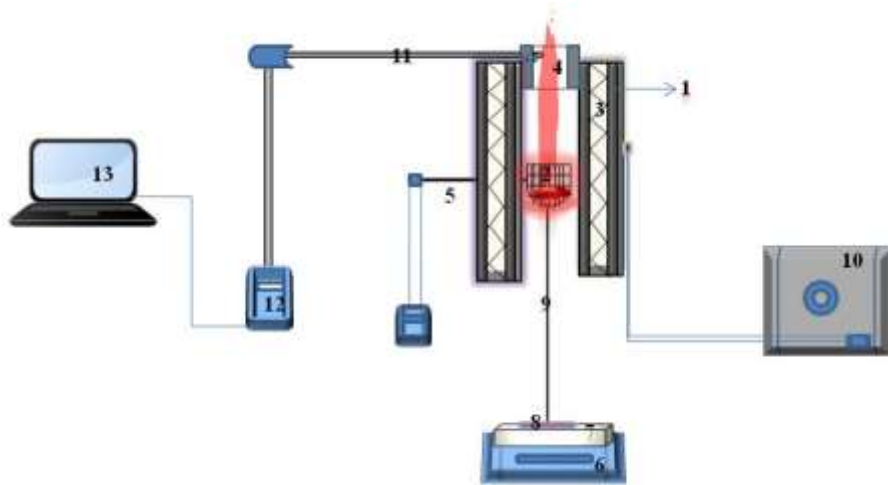
Torrefaksiyon işlemi 220, 260 ve 300 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve her bir işlem sıcaklığında 10, 20,40 ve 60 dakika yürütüldü. Elde edilen katı ürünler çalışma sıcaklıkları ve sürelerine göre adlandırıldı. Örneğin TKAO 220-10, 220 °C'de 10 dk torrefaksiyona uğramış KAO göstermektedir. Diğer torrefaksiyon peletlerinde benzer şekilde adlandırıldı.



Şekil 8.2.Torrefaksiyon Deney Düzenegi

### 8.3. Yakma Sistemi

Ham ve torrefiye ürünlerin yanma davranışları torrefaksiyon deneylerinin yürütüldüğü fırında yapıldı. Fırın içerisindeki kamara içerisine 30 mm çapında paslanmaz çelikten yapılmış elek sepet 250 mm uzunluğundaki çelik çubuğun ucuna takılmış olarak bir destek üzerine sabitlendi. Sepet ve destek yanma sırasındaki ağırlık değişimlerinin kaydedilmesi amacı ile hassas terazi ( $\pm 0,001$  g) üzerine yerleştirildi. Fırının ısıtılması değişik voltaj transformatörü yardımı ile sağlandı. Sabit yatak yakma sistemi Şekil 8.3’de verilmektedir.



Şekil 8.3 Sabit yatak yakma sistemi: 1.Refrakter tuğla; 2.Sepet; 3.Direnç teli; 4.Çelik kapak, 5.Termoçift 6.Terazi; 7.Destek; 8.Ayna; 9. Sepet çubuğu; 10.Gerilim değıştirici; 11.Prob; 12.Gaz analizörü; 13.Bilgisayar

Yakma deneylerinde ön ısıtılmış sabit yatak içindeki sepet içerisine ağırlığı bilinen KAO peleti düşüldüğü anda kronometre çalıştırıldı. Sisteme yerleştirilmiş ayna yardımı ile alev görülme ve alev sönme zamanları belirlenerek bu değerler arasındaki farktan uçucu madde yanma süresi belirlendi. Uçucu madde ayrılma periyodunda ve karbon yanma periyodunda her 5 s 'de bir peletin ağırlığı kaydedildi. Torrefiye peletlerde aynı şekilde yakıldı. Torrefiye peletlerde her bir sıcaklık ve işlem süresinde 8 adet pelet içerisinden yaklaşık olarak aynı ağırlığa sahip peletler kullanıldı. Böylece en az iki defa tekrarlanan deneylerde yaklaşık aynı kütleye sahip peletler kullanıldı. Kayın ağacı odunu ile torrefiye biyokütlelerin yanma davranışları 600 ve 700 °C fırın başlangıç sıcaklıklarında yürütüldü. Tablo 8.1'de baca gazı cihazının ölçüm aralığı verilmiştir.

Yanma sırasında baca gazı emisyonu (NO ve CO<sub>2</sub>) Testo 340 Model baca gazı analiz cihazı ile belirlendi. Baca gazı ölçüm probu 700 mm uzunlukta olup 1000 °C'ye sıcaklıklara kadar dayanıklıdır. Analizör ünitesinin üzerinde baca gazının içerisindeki nemi tutan kondensat tutucu ve baca gazı probunda baca gazı içerisindeki tozu tutan filtre sistemi bulunmaktadır. Cihazın probu yakma kamarası üzerindeki çelik kapak üzerinden yakma kamarasının ortasına gelecek şekilde yerleştirildi. Cihaza ait gaz ölçüm verileri belirli aralıklarla, bilgisayarda Excel dosyası olarak kaydedildi.

**Tablo 8.1.** Baca gazı cihazının ölçüm aralığı

Değişken	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Sıcaklık (seçilen baca gazı probuna bağlı olarak değişir)	-40,0...+ 1200,0 <sup>0</sup> C	±% 0,5
O <sub>2</sub> (oksijen)	0,0... %25,0 (hacimsel)	± % 0,8
CO <sub>2</sub> (karbondioksit)	0,0...%CO <sub>2max</sub>	Hesaplanan değişken
NO (azotmomoksit)	0...3000ppm	± % 5
Düşük seviyelerde NO	0...300ppm	± 2ppm (39,9ppm'e kadar) ±% 5 (40ppm...300ppm)
NO <sub>2</sub> (azotdioksit)	0...500ppm	± % 5
SO <sub>2</sub> (kükürtdioksit)	0...5000ppm	± % 5

#### **8.4.Kayın Ağacı Odunu ve Torrefiye Ürünlerin TGA ve Elementel Analizleri**

Kayın ağacı odununun torrefaksiyon işlemi sonrası işlem sıcaklığı ve süreye bağlı olarak lignoselülozik yapıdaki özellikle C ve O değişimini görebilmek için elementel analizleri yapıldı. Ham ve torrefiye katıların elementel analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Merkezi'nde LECO (CHNS-932) Elementel Analiz Cihazı ile yapıldı.

KAO ve her bir sıcaklıkta 40 dk işlem süresinde elde edilen torrefiye ürünlerin TGA, DTG analizleri yapıldı. TGA ve DTG analizler Erciyes üniversitesi Teknoloji araştırma ve uygulama merkezinde HITACH marka STA 7300 model Termogravimetrik Analiz analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İnert madde olarak azot gazının kullanıldığı çalışmada, 25-900°C sıcaklık aralığında 10°C/dk ısıtma hızında çalışılmıştır.



## 9. DENEYSEL SONUÇLAR

### 9.1. Torrefaksiyon İşlem Şartlarının Ürün Verimine Etkisi

Kayın ağacı odun peletlerinin düşük (220 °C), orta (260 °C) ve şiddetli (300 °C) torrefaksiyonu sonucu elde edilen katı, sıvı ve gaz ürün verimleri üzerine sıcaklığın ve işlem süresinin etkisi Şekil 9.1 Şekil 9.2 ve Şekil 9.3’de gösterilmiştir.

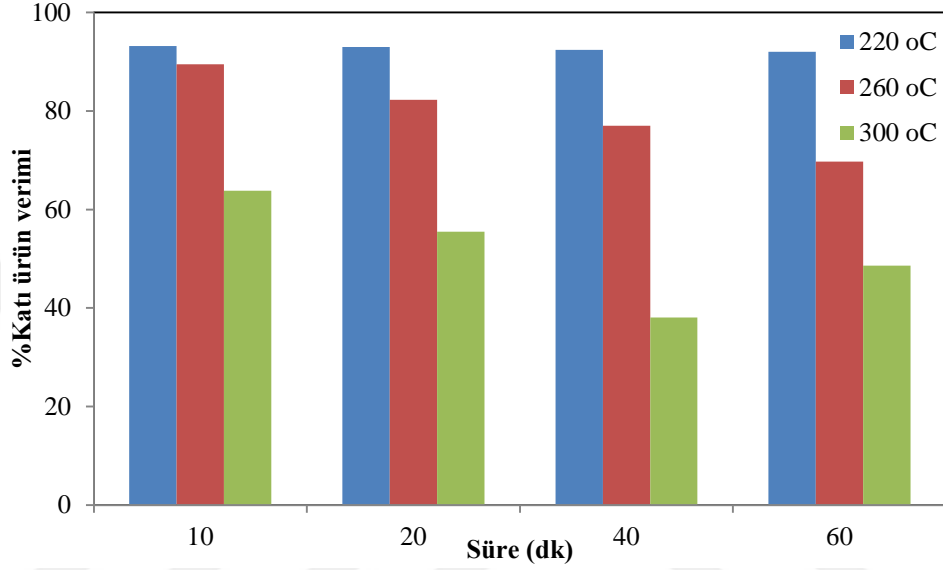
Şekil 9.1’de görüldüğü gibi katı ürün verimi torrefaksiyon şiddeti ve işlem süresinin uzamasına bağlı olarak azalmaktadır. İşlem sıcaklığının katı ürün verimi üzerinde işlem süresinden daha etkili olduğu şekilde açıkça görülmektedir. Örneğin 20 dk’lık işlem süresince 220 °C, 260 °C ve 300 °C’de elde edilen katı ürün verimleri sırasıyla %93,0; %82,3 ve %55,5 olarak belirlendi. Bu durum farklı torrefaksiyon sıcaklıklarında lignoselülozik yapıdaki hemiselüloz, selüloz ve ligninin parçalanma sıcaklık aralığı ile açıklanabilir. Odunun yapısındaki hemiselülozun parçalanmasının 200 °C’ de başladığı bilinmektedir. Selülozun depolimerizasyonu düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesine karşın uçucu bileşen çıkışı 250 °C’nin altında çok düşüktür. Selülozun sınırlı ağırlık kaybının 267 °C’de olduğu belirtilmektedir (Prins vd., 2006a). Odunun yapısını oluşturan hemiselülozun 225-325 °C, selülozun 305-375 °C ve ligninin ise 250-500 °C sıcaklık aralığında parçalandığı belirtilmiştir (Prins vd., 2006b). Ligninin parçalanma sıcaklık aralığının hemiselüloz ve selüloza göre daha geniş olduğu görülmektedir. Bu nedenle torrefaksiyon süresince kütle kaybı hemiselülozun uçucu bileşen kısmına bağlıdır. Şiddetli torrefaksiyon sonrası kalan katı ürün verimindeki azalma hemiselülozun tamamen selülozun büyük oranda ve lignini kısmen parçalandığını göstermektedir.

İşlem süresinin katı ürün verimi üzerine etkisi 260 °C ve 300 °C’de yürütülen deneylerde görülmektedir. Şiddetli torrefaksiyon işleminde (300 °C) yürütülen deneylerde 60 dk’lık işlem süresinde katı ürün verimindeki artış dikkat çekicidir. Bu durum işlem sıcaklığının yüksek olması nedeni ile uçucu bileşen çıkışının hızlı ve fazla olması sonucu pelet yüzeyinde oluşan gözeneklere sıvı ürünün işlem sırasında birikmesinden kaynaklanabilir.

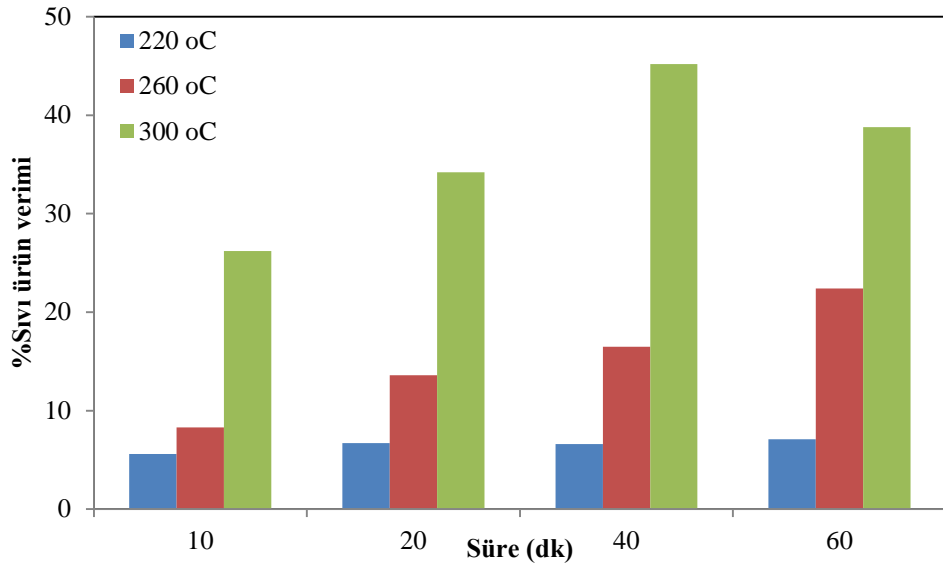
Sıvı ürün veriminin işlem sıcaklığı ve işlem süresine bağlı olarak değişimi Şekil 9.2’de görülmektedir. Sıvı ürün veriminin düşük ve orta şiddetteki torrefaksiyonda işlem süresine bağlı olarak artışı ancak şiddetli torrefaksiyonda 60 dk yürütülen deneyde düştüğü tespit edildi. Bu durum şiddetli torrefaksiyon nedeni ile peletteki gözeneklere

sıvı ürünün bir kısmının haps olmasından kaynaklanabilir. Bu sıcaklık ve sürede katı ürün verimindeki artışta bunu doğrulamaktadır.

Gaz ürün veriminin işlem sıcaklığı ve işlem süresine bağlı olarak değişimi Şekil 9.3'de görülmektedir. Gaz ürün veriminin işlem sıcaklığı ve işlem süresi ile genel olarak arttığı ancak 300 °C'de 60 dk'lık işlem süresinde azalmaktadır.

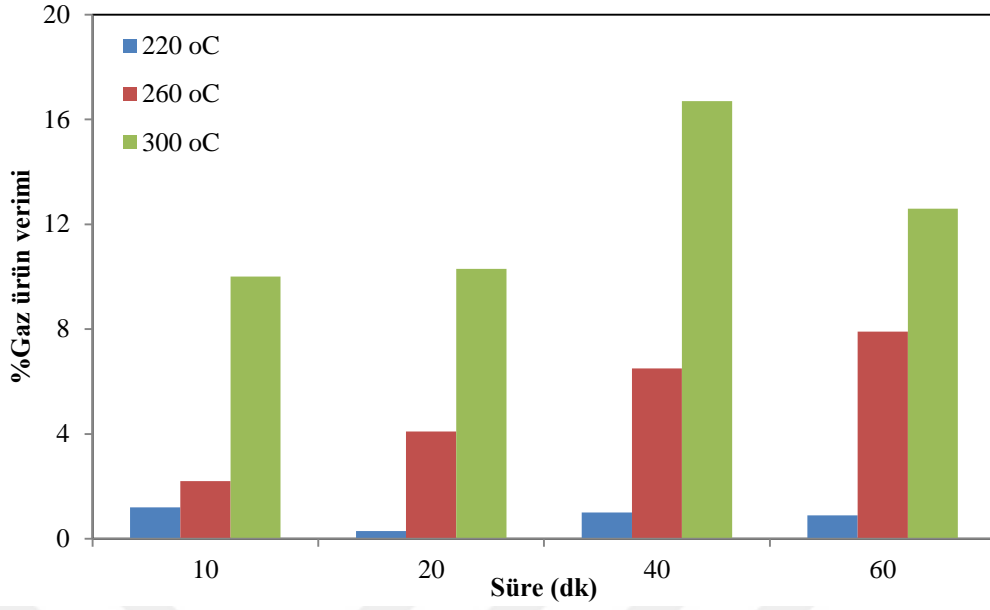


Şekil 9.1. KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak katı ürün verimi



Şekil 9.2. KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak sıvı ürün verimi





Şekil 9.3. KAO'nun farklı sıcaklıklarda işlem süresine bağlı olarak gaz ürün verimi

## 9.2. Katı Ürünün Karakterizasyonu

### 9.2.1. Katı Ürünün Kısa (Proximate) ve Elementel Analizi

Farklı sıcaklıklarda torrefiye edilmiş peletlerdeki renk değişimi Şekil 9.4'de gösterilmiştir. Hafif ve orta şiddette yürütülen deneylerdeki peletlerin görünümü uniform değildir. Bu durum peletlerin reaktör içerisinde rastgele paketlenmesinden ve azot gazının pelet yüzeyinden geçişinden kaynaklanabilir (Yılgin vd., 2019).



TKAO-220



TKAO-260



TKAO-300

Şekil 9.4. Farklı sıcaklıklarda 40 dk'lık işlem görmüş peletlerdeki renk değişimi.

Kayın ağacı odun peleti (KAO) ve torrefaksiyon işleminden sonra elde edilen torrefiye peletlerin proximate analiz sonuçları Tablo 9.1'de verilmiştir. Torrefaksiyon şiddetine bağlı olarak beklenildiği gibi torrefiye biyokütlenin uçucu madde içeriği azalmakta sabit karbon içeriği artmaktadır. Torrefaksiyon şiddetiyle kül miktarındaki artışın yalnızca şiddetli torrefaksiyonda belirgin olduğu söylenebilir.

Torrefaksiyon işleminden önce ve sonra belirlenen yaklaşık 13 adet pelet boyutlarına bağlı olarak hesaplanan pelet yoğunluğunun sıcaklık ile azaldığı Tablo 9.1'de görülmektedir. Ancak pelet yoğunluğunun her bir sıcaklıkta işlem süresine bağlı olarak düzenli bir değişim sergilememesi reaktör içerisindeki peletlerin homojen olarak torrefiye olmamasından kaynaklanmaktadır.

**Tablo 9. 1.** Kayın ağacı odunu (KAO) ve KAO'nun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye ürünlerin kısa analizi (\*: Farktan belirlendi.)

Örnek	%Nem	% Uçucu madde	% kül	% Sabit karbon*	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
KAO	3,7	84,8	0,8	14,4	1,077
TKAO220-10		83,0	1,0	16,0	0,858
TKAO220-20		82,6	0,9	16,5	0,878
TKAO220-40		81,7	0,9	17,4	0,841
TKAO220-60		82,9	0,8	16,3	0,871
TKAO260-10		80,7	0,9	18,4	0,787
TKAO260-20		76,1	0,9	23	0,771
TKAO260-40		73,8	1,0	25,2	0,775
TKAO260-60		72,8	1,0	26,2	0,764
TKAO300-10		74,6	0,9	24,5	0,708
TKAO300-20		60,9	1,4	37,7	0,648
TKAO300-40		58,0	1,5	40,5	0,517
TKAO300-60		58,9	1,5	39,6	0,621

Ham ve torrefiye katıların elementel analiz sonuçları Tablo 9.2'de verilmiştir. Torrefaksiyon şiddeti ile katı ürünün oksijen ve hidrojen içeriği azalırken karbon içeriğinin arttığı görülmektedir. Bu durum artan sıcaklıkla biyokütlerdeki düşük molekül

ağırlıklı bileşenler ile birlikte suyun buharlaşarak ayrılmasından kaynaklanmaktadır (Zhang vd., 2016).

Kayın ağacı odunundan elde edilen katı ürünlerin sıcaklık ve süre ile karbon içeriğinin arttığı oksijen içeriğinin azaldığı Tablo 9.2'de görülmektedir. Hidrojen içeriğindeki değişimin en fazla 260 °C'de daha uzun sürelerde yürütülen deneylerde ve 300 °C'de olduğu belirlenmiştir. H/C ve O/C oranları genel olarak işlem sıcaklığı ve süre ile azalmaktadır. 300°C de yapılan torefaksiyon işlemi sonucu H/C ve O/C oranlarındaki belirgin değişiklik bu sıcaklık bölgesinde selülozun büyük ölçüde parçalanmasından kaynaklanabilir (Chen vd., 2015).

**Tablo 9. 2.** Kayın ağacı odunu (KAO) ve KAO'nun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu sonucu elde edilen torefaksiyon ürünlerinin elementel analizi (\*: Farktan belirlendi.)

Örnek	%C	%H	%N	%S	%O*	Atomik H/C	Atomik O/C
KAO	46,48	6,80	0,31	0,04	46,37	1,76	0,75
TKAO220-10	46,53	6,50	0,35	0,05	46,57	1,68	0,75
TKAO220-20	46,84	6,33	0,29	0,06	46,48	1,62	0,74
TKAO220-40	47,41	6,14	0,27	0,07	46,11	1,55	0,73
TKAO220-60	47,79	6,12	0,27	0,02	45,80	1,54	0,72
TKAO260-10	47,06	6,12	0,25	0,04	46,53	1,56	0,74
TKAO260-20	50,93	6,49	0,35	-	42,23	1,53	0,62
TKAO260-40	49,64	5,84	0,28	-	44,24	1,41	0,67
TKAO260-60	50,23	5,95	0,24	0,02	43,56	1,42	0,65
TKAO300-10	48,87	5,22	0,25	-	45,66	1,28	0,70
TKAO300-20	54,69	5,77	0,35	-	39,19	1,27	0,54
TKAO300-40	57,64	5,06	0,35	0,03	36,92	1,05	0,48
TKAO300-60	53,32	5,82	0,30	0,07	40,49	1,31	0,57

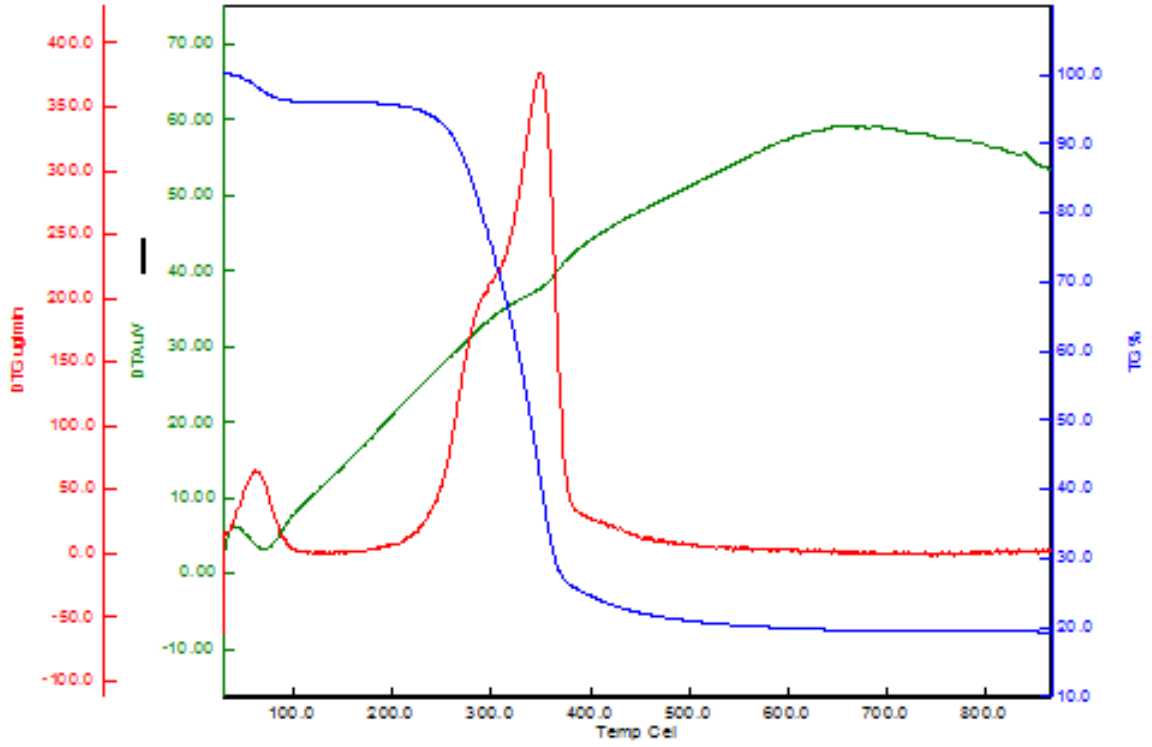
Tablodaki H/C ve O/C değerleri literatür ile uyumludur. Bambunun 200-300 °C'de torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünlerin H/C ve O/C oranları sırasıyla 1,52-0,88 ve 0,70-0,30 aralığında değiştiği vurgulanmıştır (Wen vd., 2014).

## 9.2.2. Katı Ürünün TGA Analizi

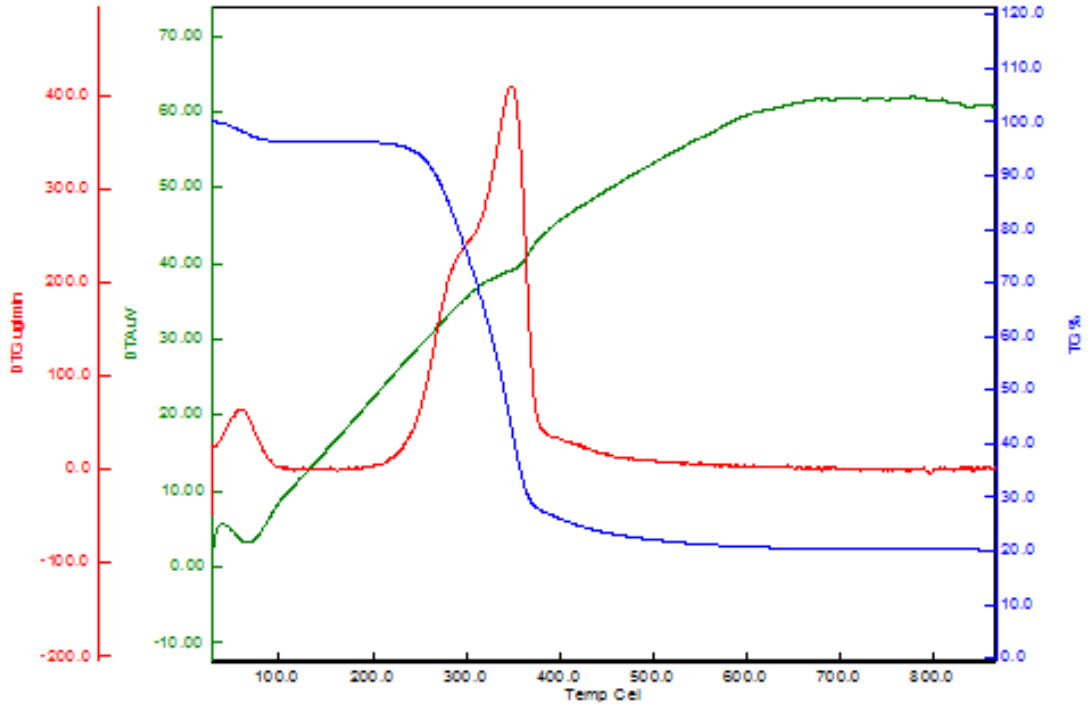
Biyokütledeki selüloz, hemiselüloz ve ligninin termal kararlılıkları farklı olduğundan parçalanmaları farklı sıcaklık bölgelerinde meydana gelmektedir. Bu nedenle torrefaksiyon süresince biyokütlenin yapısındaki değişim TGA ve DTG eğrilerinden belirlenebilir. Torrefaksiyon işleminin biyokütle üzerindeki etkisini belirlemek için ham ve işlem görmüş numunenin TGA, DTG ve DTA analizleri yapıldı.

Ham odun ve torrefiye ürünlerin (220 °C, 260 °C ve 300 °C'de 40 dk'lık işlem süresi sonunda elde edilen katı ürünler) TGA, DTG ve DTA analizleri Şekil 9.5 - Şekil 9.8'de görülmektedir. DTG eğrilerinde 110 °C'den düşük sıcaklıkta görülen küçük pik nem ve uçucu bileşenleri göstermektedir. Eğrilerden ağırlık kaybının en fazla 250-380 °C sıcaklık aralığında meydana geldiği görülebilir. 310-330 °C 'deki pik hemiselülozun, 350 °C'deki yüksek pik selülozun ve 400-700 °C sıcaklık aralığında görünen küçük pikler lignini parçalanmasına işaret etmektedir (Abedi vd., 2017).

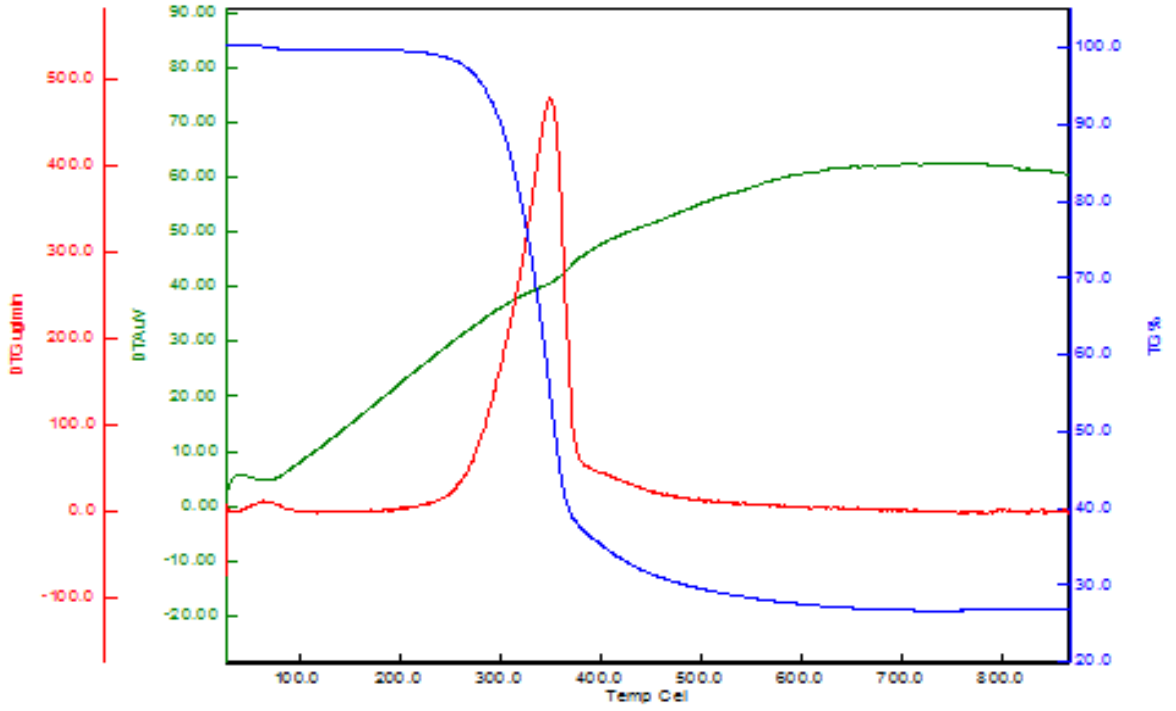
Kayın ağacı odununun torrefaksiyonundan elde edilen torrefiye katı ürünlerin DTG eğrileri işlem sıcaklığı arttıkça selüloz pikinin yoğunluğunun azaldığını hemiselüloza ait pikin 260 °C ve 300 °C'de elde edilen torrefiye ürünlerde kaybolduğunu göstermektedir. KAO-300 katıya ait DTG eğrisi bu sıcaklıkta torrefiye üründe büyük oranda ligninin kaldığını yapıdan büyük oranda selülozun parçalandığını hemiselülozun tamamen parçalandığını göstermektedir. KAO-300 ürününde 50-100 °C'deki pikin şiddetindeki artış torrefaksiyon şiddetinin yüksek olması nedeni pelet yüzeyindeki gözeneklerin fazla olması nedeni ortam neminin gözeneklere haps olmasından kaynaklanabilir. Bu durum işlem süresinin 60 dk olduğu KAO-300 katı üründe oksijen içeriğindeki artış ve karbon içeriğindeki azalma ile açıklanabilir.



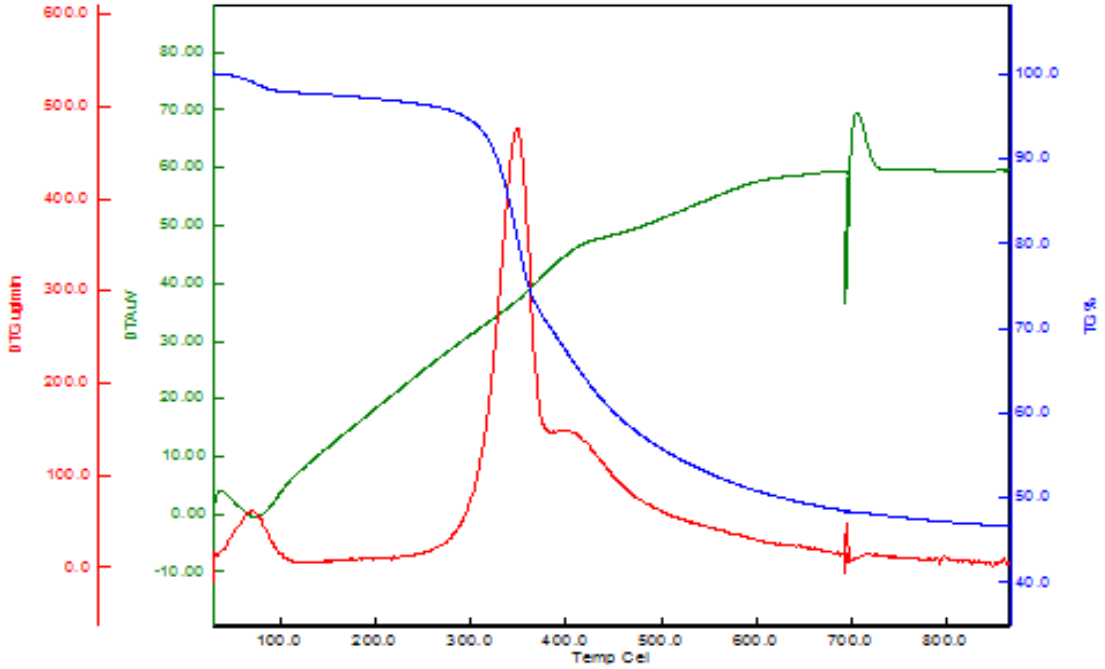
Şekil 9.5. Kayın ağacı odununun TGA, DTG ve DTA analizi



Şekil 9.6. Kayın ağacı odununun 220 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



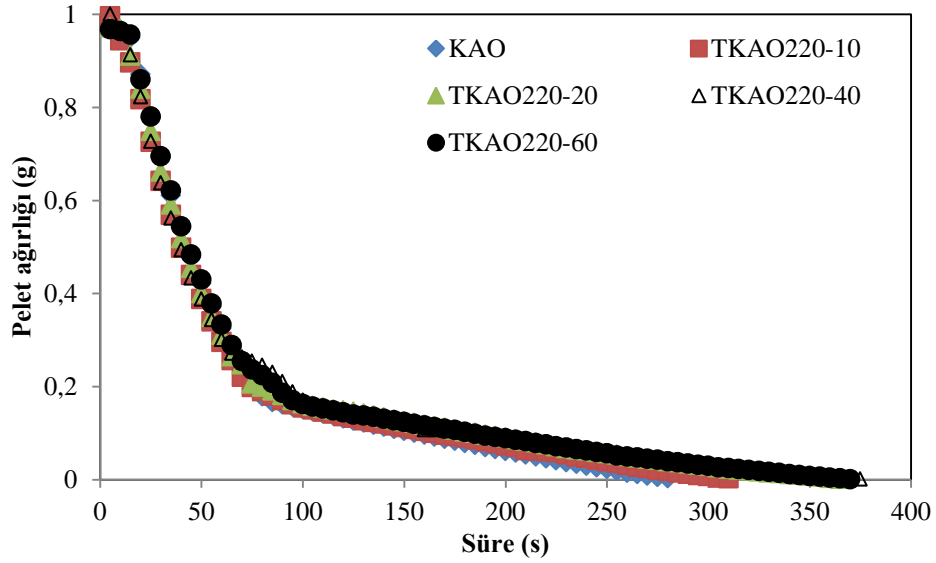
Şekil 9.7. Kayın ağacı odununun 260 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi



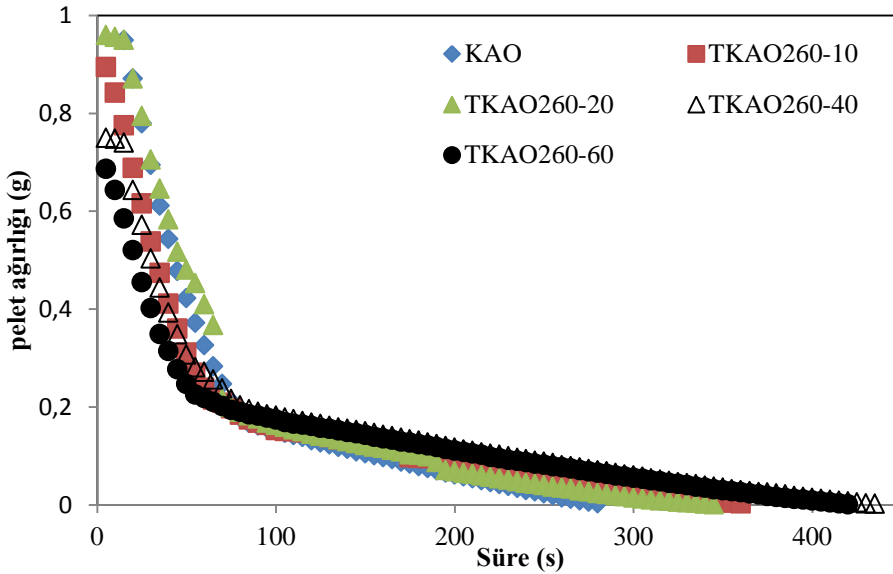
Şekil 9.8. Kayın ağacı odununun 300 °C'de 40 dk torrefaksiyonundan elde edilen katı ürünün TGA, DTG ve DTA analizi

### 9.3. Ham odun ve Torrefiye Peletlerin Yanma Davranışı

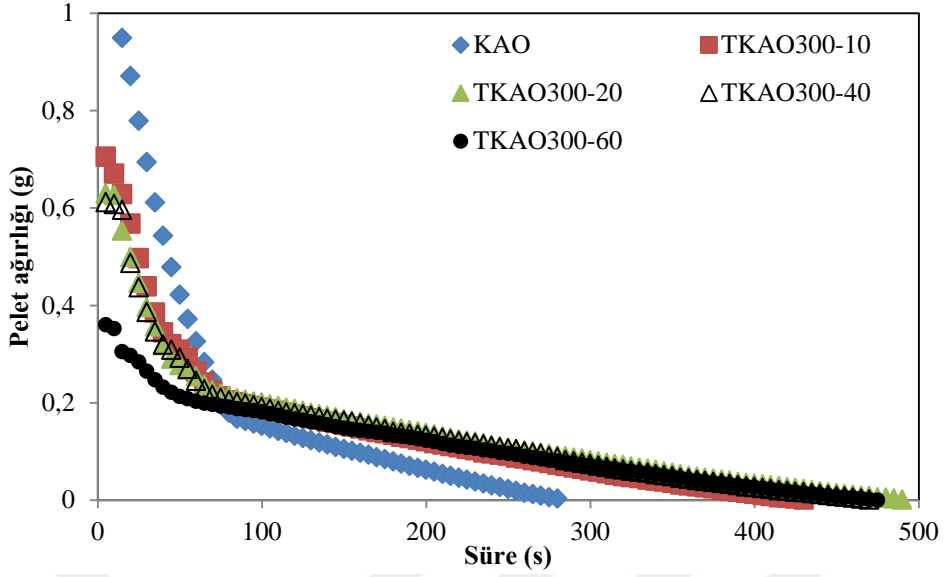
Ham kayın ağacı odununun (KAO) ve farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen torrefiye KAO'nun 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında yanma sırasında peletlerin zamanla ağırlık değişimi Şekil 9.9- Şekil 9.11'de görülmektedir. Grafikte uçucu madde ve karbon yanma periyodunun görüldüğü iki farklı yanma bölgesi bütün peletlerde açıkça gözlenmektedir.



Şekil 9.9. Kayın ağacı odununun ve 220 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri



Şekil 9.10 Kayın ağacı odununun ve 260 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri



**Şekil 9.11.** Kayın ağacı odununun ve 300 °C'de işlem süresine bağlı olarak elde edilen torrefiye odun peletlerinin yanma sırasında zamanla ağırlık değişimleri

KAO ve torrefiye odunun uçucu madde ve karbon yanma davranışları arasındaki fark özellikle 260 °C ve 300 °C'deki torrefiye ürünlerde görülmektedir. İşlem görmemiş KAO ile torrefiye KAO arasındaki fark uçucu madde ve karbon yanma periyodunda net olarak görülmektedir.

Kayın ağacı odununun ve torrefiye odununun 600 °C'de yakma işleminde elde uçucu madde yanma periyoduna ait veriler Tablo 9.3'de verilmiştir. Alev görülme süresinin torrefiye ürünlerde işlem görmemiş oduna göre kısaldığı belirlendi. Peletin tutuşma süresi ile alevin sönmesi arasındaki farkı gösteren uçucu madde yanma süresi torrefaksiyon şiddetine bağlı olarak azalmıştır. Uçucu madde yanma süresi 220 °C'de elde edilen torrefiye ürünler dışında azalma eğilimindedir. Bu durum torrefaksiyon işlemi sırasında biyokütlenin homojen olarak torrefiye olmamasından kaynaklanabilir.

Uçucu madde yanma hızı torrefaksiyon şiddeti ile artmıştır. Uçucu madde yanma hızı ile uçucu madde yanma süresi arasında ilişki olmadığı görüldü. Bu durum pelette tutuşmadan önce uçucu madde çıkışından kaynaklanmaktadır.

Kayın ağacı odununun ve torrefiye odununun 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında yürütülen deneylerden elde edilen uçucu madde yanma periyoduna ait veriler Tablo 9.4'de görülmektedir. Fırın başlangıç sıcaklığının 700 °C olduğu durumda da alev görülme (tutuşma süresinin) süresinin kısaldığı tespit edildi. Uçucu madde yanma süresi torrefaksiyon şiddetine bağlı olarak belirgin şekilde azalmıştır. İşlem süresine bağlı olarak her bir torrefaksiyon işleminde uçucu madde yanma süresinin genel olarak



azaldığı görüldü. Bu sıcaklıkta uçucu madde yanma hızı ile uçucu madde yanma süresi arasında ilişki kurulabileceği Tablo 9.4'de görülebilir.

600 °C'lik fırın başlangıç sıcaklığı ile 700 °C'lik fırın başlangıç sıcaklığı karşılaştırıldığında ham odun ile torrefiye odunun talem görölme süresi ve uçucu madde yanma süresinin yakma sıcaklığının 100 birim artması ile kısaldığı ve uçucu madde yanma hızının arttığı Tablo 9.3 ve Tablo 9.4'den görülebilir. Bu durum peletin parçalanma sıcaklığına yüksek sıcaklıkta daha hızlı geldiğini ve pelet etrafında uçucu bileşen konsantrasyonuna daha kısa sürede ulaştığını göstermektedir.

**Tablo 9.3.** Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında uçucu madde yanma periyoduna ait sonuçlar

Örnek	Alev görölme süresi (s)	Uçucu madde yanma süresi (s)	Uçucu madde yanma hızı (s <sup>-1</sup> )*10 <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
KAO	13	75	13,0	0,97
TKAO220-10	11	70	13,7	0,97
TKAO220-20	9,5	77	13,7	0,97
TKAO220-40	7,5	74,5	12,8	0,96
TKAO220-60	7	77	13,1	0,96
TKAO260-10	8	68,5	14,3	0,96
TKAO260-20	8,5	74	14,7	0,97
TKAO260-40	8	63	15,4	0,95
TKAO260-60	7,5	57,5	16,8	0,96
TKAO300-10	10	56,5	14,8	0,95
TKAO300-20	9	54,5	18,1	0,95
TKAO300-40	7,5	52,5	20,4	0,94
TKAO300-60	7	31	15,7	0,97

**Tablo 9.4.** Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında uçucu madde yanma periyoduna ait sonuçlar

Örnek	Alev görölme süresi (s)	Uçucu madde yanma süresi (s)	Uçucu madde yanma hızı (s <sup>-1</sup> )*10 <sup>3</sup>	R <sup>2</sup>
KAO	6	74,5	13,4	0,96
TKAO220-10	5,5	73,5	13,2	0,93
TKAO220-20	4,5	68,5	14,7	0,95
TKAO220-40	4	67,5	15,1	0,94
TKAO220-60	3	67	15,2	0,95
TKAO260-10	3	62,5	15,2	0,94
TKAO260-20	3	65	16,3	0,95
TKAO260-40	3	59,3	16,9	0,93
TKAO260-60	4	56	16,8	0,93
TKAO300-10	2,5	46,5	18,2	0,94
TKAO300-20	2	49	20,5	0,95
TKAO300-40	2,5	44	21,6	0,95
TKAO300-60	2	33,5	20,4	0,96

**Tablo 9.5.** Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında karbon yanma periyoduna ait sonuçlar

Örnek	Karbon yanma süresi ( s )	Karbon yanma hızı ( s <sup>-1</sup> )*10 <sup>4</sup>	R <sup>2</sup>
KAO	290	48,8	0,99
TKAO220-10	322,5	44,9	0,99
TKAO220-20	336,5	37,2	0,98
TKAO220-40	326	34,3	0,97
TKAO220-60	311	38,3	0,98
TKAO260-10	329,5	40,1	0,99
TKAO260-20	324,5	29,5	0,98
TKAO260-40	426	29,3	0,99
TKAO260-60	438	30,4	0,99
TKAO300-10	438,5	32,5	0,99
TKAO300-20	483	22,3	0,99
TKAO300-40	486,5	21,4	0,99
TKAO300-60	496	37,4	0,99

Kayın ağacı odununun ve torrefiye odunun 600 °C'deki fırın başlangıç sıcaklığında yakma işleminde elde edilen karbon yanma süresi ve bu süreye ait hızlar Tablo 9.5'de verilmiştir. Ham KAO'nun karbon yanma süresi 290 s iken torrefiye ürünlerde bu süre torrefaksiyon şiddeti ve süresine bağlı olarak artış göstermiştir. Tablo 9.1'deki sabit karbon oranları ile karbon yanma süreleri arasında genel olarak bir ilişki olduğu söylenebilir. Torrefaksiyon işlemi ile torrefiye üründeki karbon içeriğinin artması nedeni ile karbon yanma süresinde artış görülmektedir. Karbon yanma süresi ile karbon yanma hızı arasında da ilişki olduğu görülmektedir.

Fırın başlangıç sıcaklığının 700 °C olduğu durumda da karbon yanma süresinin torrefaksiyon şiddeti ile arttığı görüldü. İşlem süresine bağlı olarak her bir torrefaksiyon işleminde karbon yanma süresinin arttığı tespit edildi.

600 °C'lik fırın başlangıç sıcaklığı ile 700 °C'lik fırın başlangıç sıcaklığı karşılaştırıldığında ham odun ve torrefiye odunun karbon yanma süresinin kısaldığı ve karbon yanma hızının arttığı Tablo 9.5 ve Tablo 9.6'da görülmektedir.

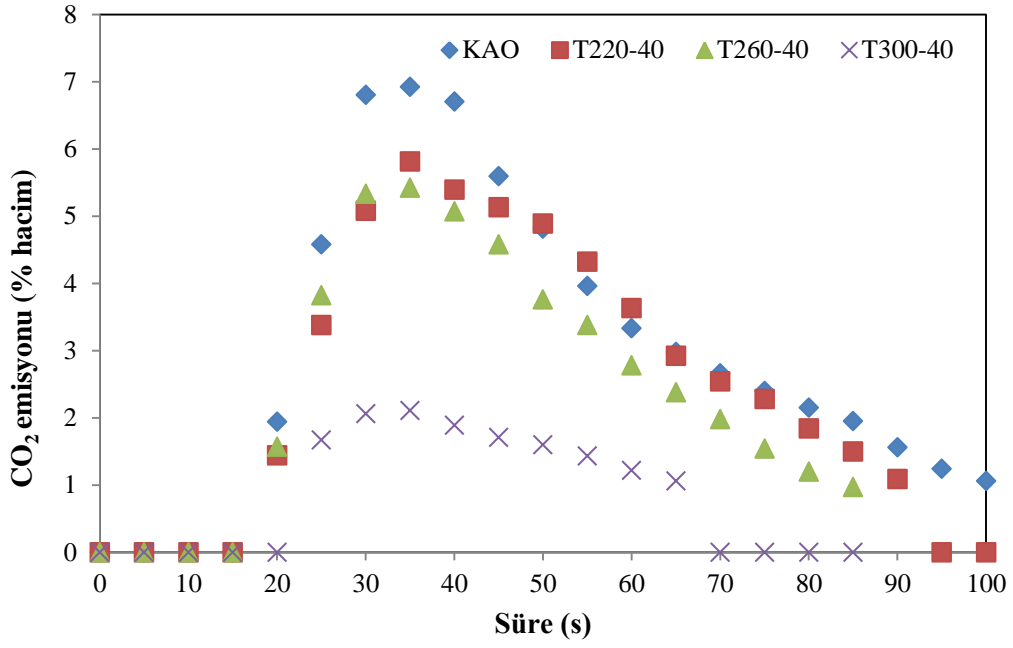
**Tablo 9.6.** Kayın ağacı odunu ve torrefiye odunun 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında karbon yanma periyoduna ait sonuçlar

Örnek	Karbon yanma süresi ( s )	Karbon yanma hızı ( s <sup>-1</sup> )*10 <sup>4</sup>	R <sup>2</sup>
KAO	253	53,0	0,99
TKAO220-10	273	52,3	0,99
TKAO220-20	281,5	40,2	0,99
TKAO220-40	271,5	46,4	0,99
TKAO220-60	259,5	44,7	0,98
TKAO260-10	252,5	41,1	0,99
TKAO260-20	292	31,9	0,99
TKAO260-40	358	33,3	0,99
TKAO260-60	366,5	33,0	0,99
TKAO300-10	398	42,8	0,99
TKAO300-20	417,5	29,8	0,99
TKAO300-40	419	25,2	0,99
TKAO300-60	437,5	34,3	0,99

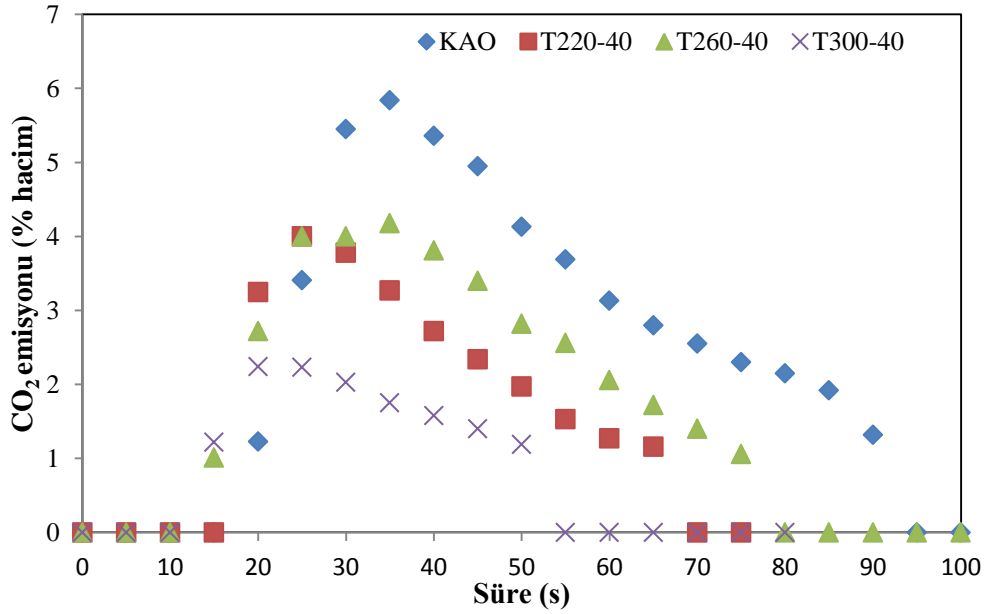
#### 9.4. CO<sub>2</sub> ve NO emisyonu

Ham ve torrefiye ürünlerin 600 ve 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında yakılması sırasında uçucu madde yanma periyodunda belirli sürelerde kaydedilen CO<sub>2</sub> emisyonu Şekil 9.12 ve Şekil 9.13'de görülmektedir. Peletin tutuşma sıcaklığına kadar baca gazı içerisinde karbondioksitin görülmediği tutuşma sonrası karbondioksit emisyonun başladığı ve maksimum değere ulaştıktan sonra azaldığı tespit edildi. Karbondioksit oluşumunun uçucu madde miktarı ile ilişkili olduğu görülmektedir. Torrefaksiyon şiddeti arttıkça hafif uçucu bileşenler ile yanabilen uçucu bileşen miktarının azalması nedeni ile CO<sub>2</sub> emisyonu azalmaktadır.

Ham odun ve torrefiye ürünlerin tutuşma sürelerine bağlı olarak karbondioksit emisyonunun görülmesi arasındaki fark 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında yürütülen deneylerde açıkça görülmektedir. Yüksek yakma sıcaklığında CO<sub>2</sub> emisyonunun azaldığı görüldü. Bu durum sıcaklık nedeni ile karbondioksitin char yüzeyinde CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltıcı reaksiyonun olmasından kaynaklanabilir. CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalma özellikle T220-40 ve T260-40 torrefiye ürünlerinde daha belirgin olması pelet gözenekliliğinin bu reaksiyonun gerçekleşmesinde yardımcı olduğunu gösterebilir.



Şekil 9.12. Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen CO<sub>2</sub> emisyonu

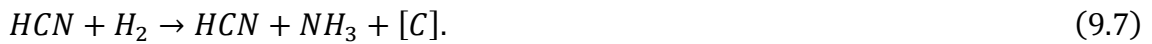


Şekil 9.13. Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen CO<sub>2</sub> emisyonu

## 9.5. NO emisyonu

Azot biyokütlede başlıca alifatik yapılı (amino ve amonyum) kömürde ise aromatik yapılı (piridin ve pirolük yapılı) bileşikler olarak bulunmaktadır. Katı yakıttaki azot uçucu-N ve char-N olarak sınıflandırılabilir. Biyokütledeki azot genel olarak düşüktür

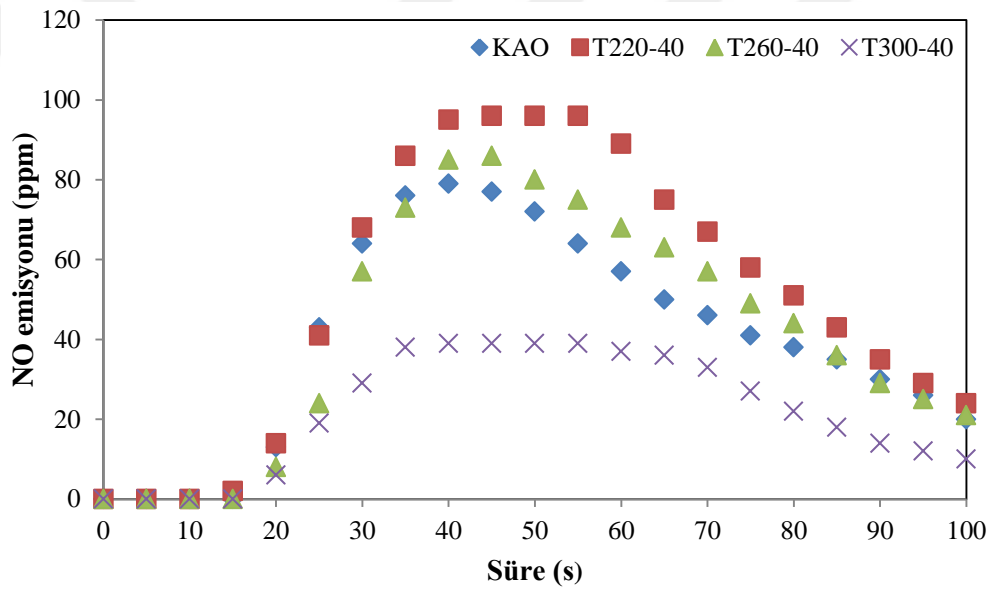
ve yüksek miktarda NH<sub>3</sub> ve HCN olarak salınır. NH<sub>3</sub> oluşumu yakıttaki azottan direkt oluşabileceği gibi HCN'nin NH<sub>3</sub> oluşumunu sağlayan reaksiyonundan da üretilmektedir. Bu reaksiyonda HCN yakıt gözeneklerinde yakıtın hidrojeni ile reaksiyona girerek amonyak oluşumunu sağlar. Gözeneklerde çok uzun süre kalma durumunda düşük ısıtma hızında olduğu gibi daha fazla amonyak üretilir (9.6 ve 9.7 reaksiyonları). Yakıttaki azottan direkt NH<sub>3</sub> oluşumu düşüktür. Ayrıca HCN'ün yakıttaki O ve OH radikalleri ile oksidasyonundan N<sub>2</sub>O ve CO oluşumunun gerçekleştiği reaksiyonlarda mevcuttur (9.3 ve 9.4 reaksiyonları). NO emisyonu yakıtın bileşiminin yanı sıra alev sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu gibi yanma şartlarına bağlıdır.



Ham odun ve torrefiye odununun 600 ve 700 °C'deki uçucu madde yanma periyodunda belirli zamanlarda kaydedilen NO emisyonunun sıcaklık ve torrefaksiyon şiddetine bağlı olarak değişimi Şekil 9.14 ve 9.15 'de gösterilmiştir. Pelettin tutuşma sıcaklığına ulaşıncaya kadar baca gazında NO emisyonunun olmadığı NO emisyonunun pelettin tutuşmasından sonra oluşmaya başladığı ve maksimum seviyeye ulaştıktan sonra azalarak kısmen char yanma kademesinde devam ettiği görülmektedir.

Fırın başlangıç sıcaklığının 600 °C olduğu sıcaklıkta ham ve torrefiye ürünlerin NO emisyonu incelendiğinde (Şekil 9.14) 220 ve 260 °C'de elde edilen torrefiye ürünlerde NO oluşumunun ham odundan yüksek olduğu en düşük NO emisyonun 300 °C'de elde

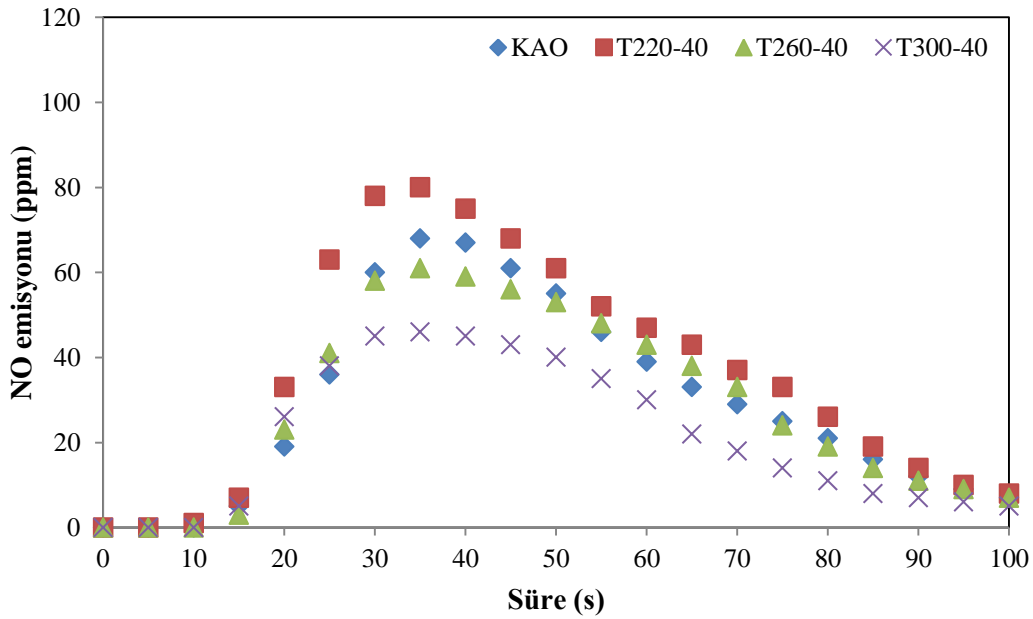
edilen T300-40 yakıttan salındığı görülmüştür. Tablo 9.2 incelendiğinde yakma işleminde kullanılan ham ve torrefiye katılarda en yüksek azot içeriğine T300-40 sahiptir. Ham odundaki azot ve hidrojen içeriği T220-40 ve T260-40 ürünlerinden yüksek olmasına karşın yanma sırasındaki NO oluşumu düşüktür. Bu durum torrefaksiyon işlemi sırasında pelettin gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Uçucu madde yanma periyodu sırasında yakma sıcaklığının düşük olması nedeni ile yakıt azotundan oluşan HCN'ün pelet gözeneklerinde yakıt hidrojeni ile reaksiyonundan NH<sub>3</sub> oluşumunun daha yüksek olduğunu gösterebilir (9.6 ve 9.2 reaksiyonları). T300-40 ürününde ise pelettin gözenekli yapısının daha yüksek olması nedeni NH<sub>3</sub> ile NO arasındaki reaksiyon ile NO oluşumunun azaldığı söylenebilir (9.2 reaksiyonu).



**Şekil 9.14.** Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 600 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen NO emisyonu

Fırın başlangıç sıcaklığının 700 °C olduğu sıcaklıkta ham ve torrefiye ürünlerin NO emisyonu incelendiğinde NO emisyonundaki değişimin 600 °C fırın başlangıç sıcaklığına benzer olduğu söylenebilir. Ancak beklenen aksine NO emisyonunun T300-40 dışında azaldığı görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık nedeni NO oluşumunu azaltıcı NO ve NH<sub>3</sub> arasındaki reaksiyon (9.4 reaksiyonu) ve HCN'nin NCO dönüşüm reaksiyonlarından kaynaklanabilir (9.3 reaksiyonu). Kömürün piroliz çalışmalarında sıcaklığın artması ile NH<sub>3</sub> miktarının azaldığı ve HCN miktarının arttığı vurgulanmıştır. T300-40 ürününde azot içeriği yüksek olmasına karşın diğer iki üründen daha düşük

NO emisyonu vermesi ve T220-40 ve T260-40 ürünlerinin benzer azot içermesine karşın NO emisyonlarının farklı olması uçucu madde yanma periyodunda NO emisyonunun yalnızca yakıtın azot içeriğine bağlı olmadığını göstermektedir. Fırın başlangıç sıcaklığının 700 °C olduğu yakma deneylerinde aynı zamanda T220-40 ve T260-40 ürünlerin NO emisyonunun azalması bu yakıtların gözenekliliğinden kaynaklanmaktadır. Sıcaklığın etkisi ile HCN'nin NH<sub>3</sub>'e dönüşmesi ve NH<sub>3</sub>'ün NO'e dönüşmesi ve gözeneklilik nedeni ile NO ve NH<sub>3</sub> arasında NO emisyonunu azaltıcı reaksiyonların gerçekleşmesinden kaynaklanabilir. Şiddetli torrefaksiyondan elde edilen T300-40 ürününde ise bu yakıt içerisindeki azotlu bileşiklerin daha çok aromatik yapılu bileşikler olmasından kaynaklanabilir. Aromatik yapılu azotlu bileşiklerin daha yüksek sıcaklıkta parçalanması nedeniyle NO emisyonunu azaltıcı reaksiyonların daha düşük olduğu söylenebilir. Literatürde kızıl ağacın yanması sırasında N<sub>2</sub>O oluşumu gözlenmez iken ladin ve kayın ağacı odunlarında N<sub>2</sub>O oluşumunun olduğu belirtilmektedir(Winter vd., 1999).



**Şekil 9.15.** Ham odun ile 40 dk'lık işlem sürelerinde elde edilen torrefiye ürünlerin 700 °C fırın başlangıç sıcaklığında kaydedilen NO emisyonu

## 10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kayın ağacı odununun pelet halinde farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyon işlemi ile elde edilen torrefiye ürünlerin yanma davranışının incelendiği çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Torrefaksiyon işlemi ve katı ürün ile ilgili elde edilen sonuçlar:

- ✓ Torrefaksiyon şiddetiyle katı ürün veriminin azaldığı tespit edildi.
- ✓ Katı ürün verimi üzerinde sıcaklığın işlem süresinden daha etkili olduğu belirlendi.
- ✓ Torrefaksiyon şiddetinin artması ile sıvı ve gaz ürün veriminde artış görüldü.
- ✓ Peletlerin homojen bir şekilde torrefiye olmadığı gözlemlendi.
- ✓ Torrefiye katı ürünün uçucu madde içeriğinde azalma ve sabit karbon içeriğinde artış olduğu tespit edildi.
- ✓ Torrefiye katıların karbon içeriğinde artış oksijen içeriğinde azalma olduğu belirlendi.
- ✓ TGA ve DTG analizlerinde şiddetli torrefaksiyon işlemi sonucu elde edilen katı ürünün lignin içeriği belirginleşirken hemiselülozun tamamen parçalandığı ve selülozun parçalanmasının kısmen gerçekleştiği sonucuna varıldı.

Ham ve torrefiye peletlerin farklı sıcaklıklarda yakılması sonucunda elde edilen sonuçlar:

- ✓ Ham odun peletinin tutuşma süresinin torrefiye peletlerden daha yüksek olduğu görüldü.
- ✓ Torrefiye peletlerin uçucu madde yanma sürelerinin torrefaksiyon sıcaklığı ve işlem süresi ile kısaldığı belirlendi.
- ✓ Uçucu madde yanma süresi ile uçucu madde yanma hızı arasında ilişki olmadığı görüldü.
- ✓ Karbon yanma süresinin torrefiye üründe işlem şiddeti ve süresine bağlı olarak arttığı tespit edildi.
- ✓ Karbon yanma süresi ile karbon yanma hızı arasında ilişki olduğu tespit edildi.
- ✓ Uçucu madde yanma periyodu ile karbon yanma periyodunun fırın başlangıç sıcaklığından etkilendiği sonucuna varıldı.



- ✓ Torrefiye ürünlerin yanma sırasında ölçülen CO<sub>2</sub> emisyonunun ham oduna göre düşük olduğu belirlendi. Torrefikasyon şiddeti ile karbondioksit emisyonunu azaldığı ve yakma sıcaklığı ile CO<sub>2</sub> emisyonunun düştüğü tespit edildi.
- ✓ Torrefiye ürünlerin yanma sırasında ölçülen NO emisyonunun ham oduna göre yüksek olduğu belirlendi. Katı ürünün azot içeriği ile NO emisyonu arasında direkt bir ilişki kurulamayacağı görüldü. Torrefaksiyon işlemi sonrası peletin gözenekliliğinin NO emisyonu üzerinde etkili olabileceği sonucuna varıldı.

Kayın ağacı odununun farklı sıcaklık ve sürelerde torrefaksiyonu sonucu elde edilen torrefiye peletlerin dayanıklılığının, öğütülebilirliği ve higroskopik özelliklerinin belirlenmesi taşıma, depolama ve kömür ile birlikte kullanımı açısından önemlidir. Ayrıca torrefiye ürünlerin kömür ile birlikte karışım halinde yanma davranışının ( uçucu madde ve karbon yanma periyodu) incelenmesi önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abedi, A., Cheng, H., Dalai, A.K.** (2018). Effects of Natural Additives on the Properties of Sawdust Fuel Pellets. *Energy Fuels* ; 32:1863–1873
- Acharya, B.** (2013). “Torrefaction and Pelletization of Different Forms of Biomass,” M.Sc Thesis, School of Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada.
- Arenas, C. N.; Navarro, M. V; Martíneza, J. D.** (2019 ). Pyrolysis kinetics of biomass wastes using isoconversional methods and the distributed activation energy model, *Bioresource Technology* 288 , 121485
- Arshanitsa, A.; Dizhbite, T.; Bikovens, O.; Pavlovich, G.; Andersone, A.; Telysheva, G.** (2016).”Effects of Microwave Treatment on the Chemical Structure of Lignocarbhydrate Matrix of Softwood and Hardwood”; *Energy Fuels* , 30: 457–464.
- Barta-Rajnai, E.; Wang, L.; Sebestyén, Z.; Barta, Z.; Khalil, R.; Skreiberg, Ø.; Grønli, M.; Jakab, E. Czégény, Z.** (2017).” Comparative study on the thermal behavior of untreated and various torrefied bark, stem wood, and stump of Norway spruce”; *Applied Energy* , 204 : 1043–1054.
- Basu, P.** (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, ISBN 978-0-12-37488-8.
- Basu, P.** (2013). “ In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*”; Academic Press: San Diego, CA, pp 47–84, 147–176.
- Baumann ve ark.** (2012).” Intermediate energy infobook, National Energy Education Development Project.
- Baykan, A.** (2011). Düşey Boru Fırında Biyokütlenin Termal Davranımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bergman, P.C.A.** (2005).”Combined torrefaction and pelletisation The TOP process”.
- Bergman, P.C.A.; Boersma, A.R.; Kiel, J.H.A.; Zwart, R.W.H.** (2005). “ Development of torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations”, *BIOCOAL* concept version, ECN Report.
- Bi, T.** (2012). 'Torrefaction and Densification of Biomass,' Presentation, Biomass and Bioenergy Research Group, Clean Energy Research Center, University of British Columbia, 20th March 2012.

- Bourgeois J, Bartholin MC, and Guyonnet R. (1989).** "Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product". *Wood Sci Technol* 23, 303–310.
- Brachi, P.; Miccio, F.; Miccio, M.; Ruoppolo, G. (2016).** "Torrefaction of Tomato Peel Residues in a Fluidized Bed of Inert Particles and a Fixed-Bed Reactor"; *Energy Fuels*, 30: 4858–4868.
- Bridgeman, T. G .; Jones, J. M.; Williams, A.; Waldron, D. J. (2010).** "An investigation of the grindability of two torrefied energy crops"; *Fuel* ,89 (12) :3911- 8.
- Bridgwater, T. (2006).** "Review Biomass for Energy, *Journal of the Science of Food and Agriculture*" 86: 1755-1768.
- Chen, W. H.; Kuo, P; C. (2011).** Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis, *Energy* 36 , 6451-6460
- Chen, W.H.; Hsu, H.C.; Lu, K.M.; Lee, W.J.; Lin, T.C. (2011).** " Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass"; *Energy*, 36: 3012–3021.
- Chen, W. H.; Zhuang, Y. Q.; Liu, S. H.; Juang, T. T.; Tsai, C. M. (2015).** " Product characteristics from the torrefaction of oil palm fiber pellets in inert and oxidative atmospheres"; 199: 367-374.
- Chen, W.H.; Peng, J.H.; Bi, X.T. (2015).** " A state-of-the –art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*" ; 44: 847-866.
- Demirbas, A. (2009).** *Biohydrogen*, © Springer
- Demirbaş, A. (2008).** "Importance of Biomass Energy Sources for Turkey"; *Energy Policy*, 36: 834-842.
- Gil, M.; Schott, D.; Arauzo, I; Teruel E. (2013).** "Handling behavior of two milled biomass: SRF poplar and corn stover." *Fuel Processing Technology* 112 : 76-85.
- Huang, Y.F.; Chen, W.R.; Chiueh, P.T.; Kuan , W.H.; Lo, S.L. (2012).** " Microwave torrefaction of rice straw and pennisetum"; *Bioresource Technology*, 123: 1–7.
- Iren, M.A.( 2015).** " Chemical kinetics of biomass and sorbent blends for gasification purposes, Ph.D Thesis ,In The Faculty of Faculty of Science and Agriculture University of Fort Hare.

- Isemin, R.; Mikhaleva, A.; Klimova, D.; Grammelis, P.; Margaritis, N.; Kourkoupas, D. S.; Zaichenko, V. (2017).**” Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw “; Fuel , 210: 859–865.
- Kajina, W.; Rousset, P.; Chen, W. H.; Sornpitak, T.; Commandre, J. M. (2017).**” Coupled effect of torrefaction and blending on chemical and energy properties for combustion of major open burned agriculture residues in Thailand” ; Renewable Energy, 118 : 113-121.
- Kapluhan, E. (2014).**”Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki Ve Türkiye’deki Kullanım Durumu” ; Marmara Coğrafya Dergisi Sayı: 30, Temmuz - S.97-125.
- Karagöl, E. T.; Kavaz, İ. (2017).**”Dünyada Ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji” ; Analiz, Nisan Sayı: 197. 1-30.
- Kauriinoja, A. (2010).**"Master thesis on Small-scale biomass-to-energy solutions for northern," University of Oulu, Oulu.
- Kohl, T. ; Laukkanen, T.; Järvinen, M.; Fogelholm, C, J. (2013).** "Energetic and environmental performance of three biomass upgrading processes integrated with a CHP plant." Applied Energy 107 (2013): 124–134.
- Kumar, L.; Koukoulas, A. A.; Mani, S.; Satyavolu, J.( 2016).**”Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review” ; Energy Fuels , 31: 37-54.
- Lu, K.M.; Lee, W.J.; Chen, W.H.; Liu, S.H.; Lin, T.C.(2012).** "Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and Eucalyptus in nitrogen and air atmospheres"; Bioresource Technology 123:98-105.
- Medic, D. (2012).**” Investigation of torrefaction process parameters and characterization of torrefied biomass” ; Graduate Theses and Dissertations.
- Meteoğlu, M. (2006).** Çeşitli Biyokütle Numunelerinin Yanma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Mohan, D.; Pittman, C.U.; Steele, P.H. (2006).** “Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review,” Energy and Fuels, 20 :848-889.
- Nhuchhen, D. R.; Basu, P.; and Acharya, B. (2014),** “A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction,” Int. J. Renewable Energy Biofuels, p. 506376.

- Nunes, L, J, R; Matias, J.C.O ; Catalão , J.P.S.** (2014). A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 153-160.
- Peng, J.H.; Bi, H. T.; Sokhansanj, S.; Lim, J. C.** (2012). "A Study of Particle Size Effect on Biomass Torrefaction and Densification" ; *Energy & Fuels*, 26:3826–3839.
- Pourmakhdomi, A. A.** (2014).” Comparison of energy balances of steam explosion and torrefaction technologies”; Lappeenranta University of Technology Faculty of Technology Department of Bioenergy Technology , Master’s Thesis.
- Prins, M.J.; Ptasinski, K.J.; Janssen, F.J.J.G.** (2006a). “Torrefaction of wood. Part 2. Analysis of products”; *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 77: 35–40.
- Prins, M. J.; Ptasinski, K. J.; Janssen, F. J.J.G.** (2006b).” More efficient biomass gasification via torrefaction”; *Energy* 31 : 3458–3470.
- Ru, B.; Wang, S.; Dai, G.; Zhang, L.** (2015). “ Effect of Torrefaction on Biomass Physicochemical Characteristics and the Resulting Pyrolysis Behavior”; *Energy Fuels*, 29: 5865–5874.
- Saleh, S. B.; Hansen, B. B.; Jensen, P. A.; Dam-Johansen, K.** (2013). ” Efficient Fuel Pretreatment: Simultaneous Torrefaction and Grinding of Biomass”; *Energy Fuels* ,27: 7531–7540.
- Sami M, Annamalai K, Wooldridge M.** (2001). Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science* ; 27: 171–214.
- Tomme, P., Warren, R. A. J., & Gilkes, N. R.** (1995). Cellulose Hydrolysis by Bacteria and Fungi, In: *Advances in Microbial Physiology*, Vol. 37, Poole, R. K., pp. 1-81, Academic Press, ISBN 0-12-027737-9, London, UK
- Uslu, A.** (2005).”Pre-Treatment Technologies, And Their Effects On The International Bioenergy Supply Cham Logistics” Department of Science, Technology & Society Utrecht University, the Netherlands.
- Valix, M., Katyal, S., Cheung W.H.,** (2016). “ Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse “; *Bioresource Technology*, 223: 202–209.
- Wang, S.; Ru, B.; Dai, G.; Lin, H.; Zhang, L.** (2016).” Influence mechanism of torrefaction on softwood pyrolysis based on structural analysis and kinetic modeling”; *International journal of hydrogenenergy* : 1 -8.

- Wen, J. L.; Sun, S. L.; Yuan, T. Q.; Xu, F.; Sun, R. C.** (2014). “ Understanding the chemical and structural transformations of lignin macromolecule during torrefaction”; *Applied Energy* 121 ;1–9.
- Winter, F., Wartha, C. and H. Hofbauer, H.** (1999). NO and N<sub>2</sub>O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat, *Bioresource Technology* 70, 39-49.
- Yaman, S.** (2004). Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks, *Energy Conversion and Management* ;45: 651–671.
- Yan, W., Acharjee, T. C., Coronella, C. J. & Vasquez, V. R.** (2009). “Thermal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass,” *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 28 (3) 435-440.
- Yılgin, M; Duranay, N; Pehlivan, D.** (2019). Torrefaction and combustion behaviour of beech wood pellets, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 819–826.
- Yorulmaz (Yurdakul), S.** (2006). Investigation of emissions and combustion kinetics of waste wood samples with thermal and spectral methods, Middle East Technical University, The Degree of Master.
- Zhang, S.; Dong, Q.; Zhang, L.; Xiong, Y.** (2016).”Effects of water washing and torrefaction on the pyrolysis behavior and kinetics of rice husk through TGA and Py GC/MS, *Bioresource Technology* Volume 199, January 2016, Pages 352-361.

## EKLER

### Ek.1. Örneklerin Kısa Analizleri

Uçucu madde miktarının belirlenmesi işleminde 900°C’de sabit tartıma getirilmiş krozelere yaklaşık 2 gram -100 mesh tane boyutundaki ham ve torrefiye ürünler konuldu. Krozelerin ağzı kapatılarak 900°C’ye ön ısıtılmış fırında 7 dakika bekletildi. Desikatörde soğutulan krozelerin ağırlık farkından uçucu madde miktarı belirlendi.

$$(Uçucumadde + nem)(\%) = \frac{m_k - (m_2 - m_1)}{m_k} \cdot 100 \quad (E. 1)$$

Bu eşitlikte:

$m_2$ : 950°C’de uçucu madde giderildikten sonra kroze ve numune miktarı, (g)

$m_k$ : Krozeye konulan örnek miktarı, (g)

$m_1$ : Krozenin başlangıç ağırlığı, (g)

Kül analizinde ise uçucu maddesi giderilmiş krozelerin kapakları açılarak 750 °C’de sabit tartıma gelinceye kadar fırında bekletildi. Ağırlık farkından kül miktarı belirlendi.

$$Kül(\%) = \frac{(m_3 - m_1)}{m_k} 100 \quad (E. 2)$$

Bu eşitlikte:

$m_1$ : Krozenin başlangıç ağırlığı, (g)

$m_3$ : Krozenin kül ile birlikte ağırlığı, (g)

$m_k$ : Krozeye konulan örnek miktarı, (g)

Sabit karbon miktarı (SK) ise farktan hesaplandı.

$$SK(\%) = 100 - [\%(UMM + NM) + \%Kül] \quad (E. 3)$$

Burada:

UMM: Uçucu madde oranı (%)

NM: Nem oranı (%)

## Ek-2 Uçucu Madde ve Karbon Yanma Hızlarının Hesaplanması

$$\text{Uçucu madde yanma hızı} = \frac{E}{(\text{U. M.}) * m} \quad (\text{E. 5})$$

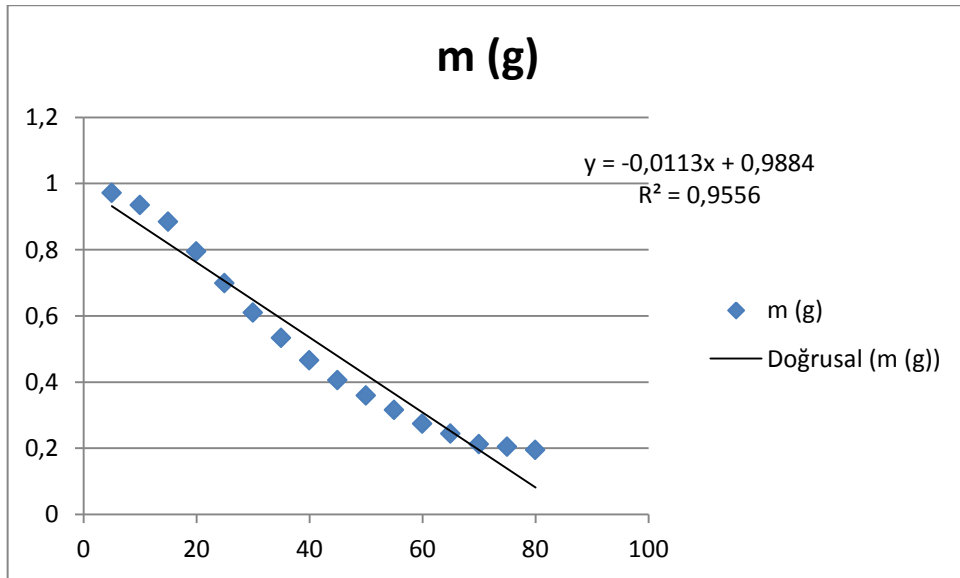
$$\text{Karbon yanma hızı} = \frac{E}{(\text{C. M.}) * m} \quad (\text{E. 6})$$

E= Eğim

U.M.=Uçucu madde oranı (%)

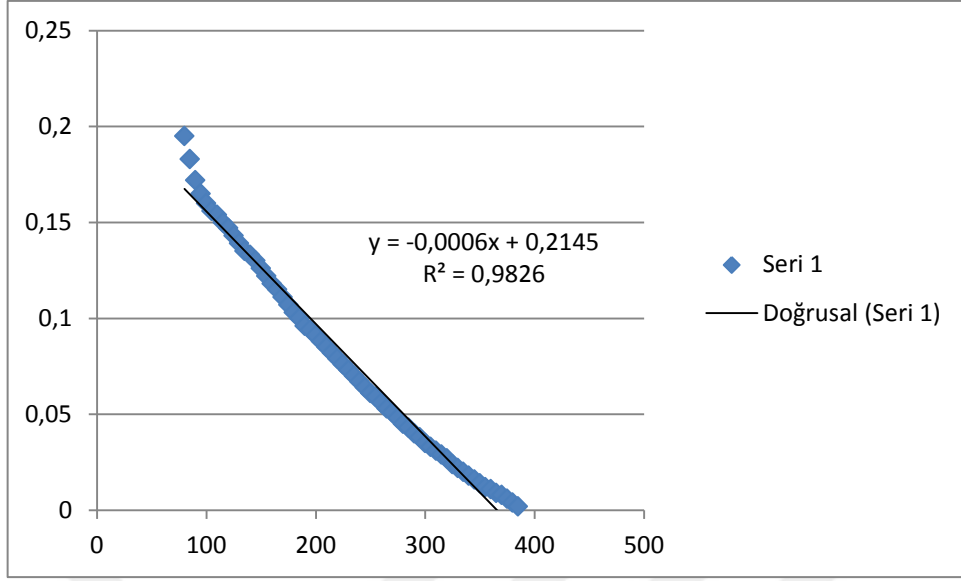
C.M.=Sabit karbon oranı (%)

m=Örneğin başlangıç ağırlığı (g)



Şekil E.1. Uçucu madde yanma periyoduna ait ağırlık değişimi





Şekil E.2. Karbon yanma periyoduna ait ağırlık değişimi

## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında İstanbul'da doğdum. Habire Yahşi Lisesi'nden 2006 yılında mezun oldum. 2010 yılında başladığım Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesindeki lisans eğitimimi 2015 yılında tamamladım. 2016 yılından beri yüksek lisans öğrenimime devam etmekteyim.

